

**JAIME FREIBERGER JUNIOR**

**INVESTIGAÇÕES PARA A CALIBRAÇÃO RELATIVA DE ANTENAS DE  
RECEPTORES GNSS**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em  
Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática,  
Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal  
do Paraná.

Orientadores:

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Cláudia Pereira Krueger  
Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Bernhard Heck  
Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (TH)

**CURITIBA  
2007**

# **“INVESTIGAÇÕES PARA A CALIBRAÇÃO RELATIVA DE ANTENAS DE RECEPTORES GNSS”**

**POR**

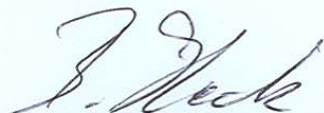
**JAIME FREIBERGER JUNIOR**

Tese nº 052 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

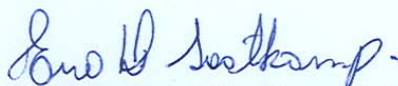
Curitiba, 28 de fevereiro de 2007.



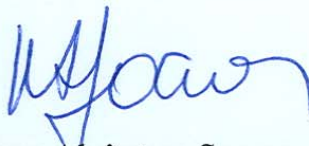
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Claudia Pereira Krueger - Orientadora e Presidente (UFPR)



Prof. Dr. Bernhard Heck – Orientador (Universidade de Karlsruhe)



Prof. Dr. Eno Darci Saatkamp - Membro (UFSM )



Prof. Dr. Wilson Alcântara Soares - Membro (UFPR)



Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira – Membro (PUCPR)



Prof. Dr. Sandro Reginato Soares de Lima - Membro (UFPR)

Labor omnia vincit  
(Virgílio)

## AGRADECIMENTOS

O autor manifesta seus agradecimentos aos professores, profissionais de instituições e colaboradores abaixo relacionados.

À Dr<sup>a</sup>. Cláudia Pereira Krueger, Professora e Coordenadora do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, a orientação.

Ao Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Bernhard Heck, Professor e Coordenador do Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (TH), a orientação.

Aos Profissionais do Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (TH): Dipl.-Ing. Andreas Knöpfler, Dipl.-Ing. Andre Nuckelt, Dipl.-Ing. Franziska Wild-Pfeiffer, Dr.-Ing. Kurt Seitz e Dr.-Ing. Michael Mayer, o companheirismo e a prontidão técnica incondicionais.

Aos Profissionais do Departamento de Agrimensura de Karlsruhe (al. *Landesvermessungsamt Karlsruhe*), do Departamento Federal de Cartografia e Geodésia (al. *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*) e da empresa Trenkle, o empréstimo de instrumentos geodésicos.

Ao Dr.-Ing. Lambert Wanninger (empresa Wasoft) e ao Dr.-Ing. Martin Schmitz (empresa Geo++), o esclarecimento de questões em torno da calibração de antenas de receptores GNSS.

Ao Prof. Dr. Carlito Vieira de Moraes, Professor da Universidade Federal de Santa Maria, a recomendação e disponibilização de bibliografias sobre o conteúdo de Metodologia Científica, Estatística e Geodésia.

Ao Prof. Dr. Eno Darci Saatkamp, Professor da Universidade Federal de Santa Maria, a recomendação e disponibilização de bibliografias sobre o conteúdo de Estatística e Eletrônica.

Aos colegas do Laboratório de Geodésia Espacial da Universidade Federal do Paraná que colaboraram nos levantamentos de campo realizados na 1<sup>a</sup>. BCALBR e contribuíram com o enriquecimento do tema pesquisado: Alexandre Ramos e Mauricio I. Sejas; aos alunos bolsistas deste laboratório: Diuliana, Fabiano, Nassau e Suelen; e aos alunos intercambistas do Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (TH): Bernhardt Schäfer e Pascal Knoch.

Ao Prof. Dr. Pedro Luís Faggion, Chefe do Laboratório de Aferição e Instrumentação Geodésica da Universidade Federal do Paraná, a disponibilização de pesquisas no acervo literário deste laboratório e a colaboração dos alunos bolsistas Daniel Perozzo e Niarkios.

Aos Profissionais da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), o benefício da bolsa de estudos.

Ao Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (TH), a ajuda financeira na fase final do estágio de doutorado em Karlsruhe, Alemanha.

À *Katholischer Akademischer Ausländer-Dienst* (KAAD), a ajuda financeira na fase final do estágio de doutorado em Karlsruhe, Alemanha.

Aos Profissionais e Voluntários da *Katholische Hochschulgemeinde Karlsruhe* (KHG) Thuid Brümmel e ao Pe. Hans-Jörg Krieg, o intercâmbio cultural e o apoio espiritual recebido nas reuniões, palestras e conferências realizadas nesta instituição.

À Sr<sup>a</sup>. Diana Bracko, Secretária do Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (TH).

À Sr<sup>a</sup>. Verali Mônica Kleuser, Secretária de Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná.

Aos Profissionais da Biblioteca de Ciências e Tecnologia da UFPR.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>xvi</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xvii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xviii</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>xix</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES SOBRE O TEMA: DEFINIÇÃO, DELIMITAÇÃO E IMPORTÂNCIA .....	1
1.2 JUSTIFICATIVA .....	3
1.3 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS NA PESQUISA .....	5
1.4 OBJETIVOS .....	6
1.4.1 Objetivo Geral .....	6
1.4.2 Objetivos Específicos .....	6
1.5 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA.....	7
1.6 ESTRUTURAÇÃO.....	8
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>9</b>
2.1 GENERALIDADES SOBRE O NAVSTAR-GPS.....	9
2.1.1 NAVSTAR-GPS.....	9
2.1.2 Desenvolvimentos do Futuro GNSS .....	10
2.1.3 Princípio do Posicionamento por Satélites .....	12
2.1.4 Observáveis GPS e Erros Envolvidos .....	14
2.1.4.1 Erros relacionados aos satélites .....	19
2.1.4.2 Erros relacionados com o meio de propagação do sinal .....	19
2.1.4.3 Erros relacionados com o receptor .....	22
2.2 DESCRIÇÃO DAS ANTENAS DE RECEPTORES GPS .....	27
2.2.1 Fundamentos da Propagação de Ondas Eletromagnéticas .....	27
2.2.2 Função e Características Gerais das Antenas .....	33
2.2.3 Características Gerais das Antenas GPS .....	36
2.2.4 Descrição do Centro de Fase e das Variações do Centro de Fase da Antena.....	38
2.3 CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GPS .....	44
2.3.1 Determinação das coordenadas do CFM.....	45
2.3.2 Calibração Absoluta em Câmaras Anecóicas.....	48
2.3.3 Calibração Absoluta em Campo .....	50
2.3.4 Calibração Relativa em Campo .....	53
2.3.5 Considerações Sobre Níveis e Formatos de Calibração .....	56
<b>3 INVESTIGAÇÕES REALIZADAS NO INSTITUTO DE GEODÉSIA DE KARLSRUHE.....</b>	<b>61</b>
3.1 LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE CALIBRAÇÃO .....	62
3.2 INSTRUMENTAÇÃO E PROGRAMAS .....	64
3.2.1 Antenas e Receptores GPS .....	64
3.2.2 Mecanismo DRB .....	69

3.2.3	Programas Computacionais .....	70
3.2.3.1	AAKDD.....	70
3.2.3.2	Wasoft/Kalib .....	72
3.2.3.3	Wasoft/Multipath.....	78
3.2.3.4	Outros programas de processamento e análise de dados.....	80
3.3	PROCESSO DE CALIBRAÇÃO .....	81
3.3.1	Levantamentos de Campo .....	81
3.3.1.1	Estação de referência KARL .....	84
3.3.1.2	Nivelamento das estações.....	85
3.3.1.3	Medições GPS .....	87
3.3.2	Processamento dos Dados .....	89
3.4	LEVANTAMENTOS PARA A ANÁLISE DA QUALIDADE DO SINAL .....	91
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS DE KARLSRUHE.....</b>	<b>94</b>
4.1	ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO INDIVIDUAL DE ANTENAS GPS .....	94
4.1.1	Análise do PCO .....	95
4.1.2	Análise das PCV Dependentes de Elevação.....	98
4.1.3	Análise das PCV Dependentes de Elevação Considerando Azimute Médio ...	104
4.1.4	Análise das PCV Dependentes de Azimute e Elevação .....	106
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE CALIBRAÇÕES ABSOLUTAS.....	109
4.3	INFLUÊNCIA DO ENTORNO DA ESTAÇÃO E DA ARQUITETURA DA ANTENA NAS PCV .....	127
4.3.1	Calibração em Diferentes Pilares .....	128
4.3.2	Influência do Plano de Terra .....	134
4.3.3	Influências de Outros Detalhes Construtivos da Antena.....	146
4.3.4	Análise do Efeito de multicaminho .....	150
4.3.5	Considerações Sobre a Razão Sinal-Ruído (SNR).....	155
<b>5</b>	<b>ESTABELECIMENTO DA PRIMEIRA ESTAÇÃO DE CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GNSS NO BRASIL.....</b>	<b>162</b>
5.1	LOCALIZAÇÃO E VIABILIDADE.....	162
5.2	CONSTRUÇÃO DOS PILARES DE CALIBRAÇÃO .....	165
5.3	MONITORAÇÃO NIVELÍTICA DA ESTRUTURA DA 1ªBCALBR .....	166
5.4	ANÁLISE DO ENTORNO DA ESTAÇÃO .....	168
5.4.1	Efeito de multicaminho .....	169
5.4.2	Razão Sinal-Ruído .....	173
5.5	ANÁLISES PRELIMINARES DA CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GPS.....	175
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>178</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>182</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>193</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

al.	–	alemão
AMU	–	ingl. <i>Arbitrary Manufacturing Unit</i> (Unidade Arbitrária do Fabricante)
ANTEX	–	ingl. <i>Antenna Exchange Format</i>
AOAD/M_T	–	Allen Osborne Associates Dorne Margolin Model T
ARP	–	ingl. <i>Antenna Reference Point</i> (Ponto de Referência da Antena)
BKG	–	al. <i>Bundesamt für Kartographie und Geodäsie</i>
1ªBCALBR	–	Primeira Base de Calibração de Antenas GNSS do Brasil
BWREF	–	ingl. <i>Baden-Württemberg Reference Frame</i>
CFM	–	Centro de fase médio
CTS	–	ingl. <i>Conventional Terrestrial System</i>
DDF	–	Dupla Diferença de Fase
DRB	–	al. <i>Drehrumbum</i> (sem significado no idioma português)
e.g.	–	lat. <i>exempli gratia</i> (por exemplo)
et al.	–	lat. <i>et alii</i> (e outros)
etc.	–	lat. <i>et cetera</i> (e outras coisas, assim por diante)
EUREF	–	ingl. <i>European Reference Frame</i>
GIK	–	<i>Geodätisches Institut Karlsruhe</i>
GNSS	–	ingl. <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	–	ingl. <i>Global Positioning System</i>
GRAF	–	al. <i>Geodätisches Referenznetz</i>
HPF1, HPF2	–	al. <i>Hauptpfeiler 1, Hauptpfeiler 2</i> (pilar central 1, pilar central 2)
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
i.e.	–	lat. <i>id est</i> (isto é)
IfE	–	al. <i>Institut für Erdmessung</i>
IGS	–	ingl. <i>International GPS Service</i>
ingl.	–	inglês
ITRF	–	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
lat.	–	latim
MARF	–	material absorvente de radiofrequência
NGS	–	ingl. <i>National Geographic Service</i>
NIMA	–	ingl. <i>National Imagery and Mapping Agency</i>
NPF1, NPF2	–	al. <i>Nebenpfeiler 1, Nebenpfeiler 2</i> (pilar lateral 1, pilar lateral 2)
NTP	–	ingl. <i>Network Time Protocol</i>
p.	–	página
PCO	–	ingl. <i>Phase Center Offset</i>
PCV	–	ingl. <i>Phase Center Variation</i>
PT	–	Plano de terra (ingl. <i>ground plane</i> )
RBMC	–	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RINEX	–	ingl. <i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RMS	–	ingl. <i>Root Mean Square Error</i> (erro médio quadrático)
RTCM SC	–	ingl. <i>Radio Technical Commission For Maritime Services, Special Committee</i>
SAPOS	–	al. <i>Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung</i>
SBAS	–	ingl. <i>Satellite Based Augmentation System</i>
S/A	–	ingl. <i>Selective Availability</i> (disponibilidade seletiva)
SDF	–	Simples Diferença de Fase
SN	–	al. <i>Seriennummer</i> (número de série)
SNR	–	ingl. <i>Signal to Noise Ratio</i> (Razão sinal-ruído)
TEC	–	ingl. <i>Total Electrons Count</i>
TEQC	–	ingl. <i>Translate Edit Quality Check</i>
TH	–	al. <i>Technische Hochschule</i>
TDF	–	Tripla Diferença de Fase



## LISTA DE SÍMBOLOS

$t$	: instante ou época da observação
$\mathbf{X}^i$	: vetor posição do satélite $i$ , de componentes $X^i, Y^i, Z^i$
$\mathbf{X}_B$	: vetor posição da antena do receptor instalado na estação $B$ , de componentes $X_B, Y_B, Z_B$
$c$	: velocidade de propagação da luz
$\delta t_B$	: erro do relógio do receptor instalado em $B$
$\tau_B^i$	: tempo de propagação do sinal entre o satélite $i$ e o receptor instalado na estação $B$
$\tilde{R}_B^i$	: distância geométrica ou raio vetor entre o satélite $i$ e o receptor instalado na estação $B$
$\delta t_{ion}$	: erro devido ao atraso ionosférico
$\delta t_{trop}$	: erro devido ao atraso troposférico
$\delta t^i$	: erro do relógio do satélite $i$
$\Phi_B^i$	: diferença de fase medida da onda portadora do receptor na estação $B$ a um satélite $i$
$\lambda$	: comprimento da onda portadora
$N_B^i$	: número inteiro de ciclos de onda (ambigüidades)
$\Phi_{n,m}$	: combinação linear da fase da portadora
$\Phi_1$	: fase medida da onda portadora $L_1$
$\Phi_2$	: fase medida da onda portadora $L_2$
$f_1$	: frequência da portadora $L_1$
$f_2$	: frequência da portadora $L_2$
$PR_1$	: pseudodistância na frequência $L_1$
$PR_2$	: pseudodistância na frequência $L_2$
$T$	: período
$v$	: velocidade de propagação de onda
$\omega$	: frequência angular

$k$	: constante de fase ou número de onda
$A$	: amplitude
$\varphi$	: ângulo de fase
$n$	: índice de refração
$P$	: potência
$G$	: ganho
$\eta$	: diretividade
$D$	: eficiência
$\vec{E}$	: vetor campo elétrico
$\vec{H}$	: vetor campo magnético
$\vec{P}$	: vetor deslocamento do centro de fase
$\alpha$	: azimuth
$e$	: ângulo de elevação
$\varphi$	: latitude geodésica
$\lambda$	: longitude geodésica
$h$	: altitude geométrica
$p$	: termo de correção do centro de fase
$\vec{e}$	: vetor unitário
$d$	: medida algébrica da projeção do vetor $\vec{P}$ sobre o vetor unitário $\vec{e}$
$dr$	: correção do centro de fase dependente da direção do sinal
$E$	: esperança matemática
$\sigma$	: desvio padrão
$\sigma^2$	: variância
$\rho$	: coeficiente de correlação

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1–GEOMETRIA DO POSICIONAMENTO POR SATÉLITES .....	12
FIGURA 2–PRINCÍPIO DO POSICIONAMENTO POR PONTO .....	14
FIGURA 3–TRIPLA DIFERENÇA DE FASE .....	17
FIGURA 4–ANTENA GEODÉSICA COM PLANO DE TERRA .....	24
FIGURA 5–ANTENA CHOKE RING .....	24
FIGURA 6–REPRESENTAÇÃO DOS CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO .....	28
FIGURA 7–POLARIZAÇÃO LINEAR, CIRCULAR E ELÍPTICA .....	29
FIGURA 8–INTERPRETAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDA .....	32
FIGURA 9–DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO .....	34
FIGURA 10–LARGURA DO FEIXE DO DIPOLO DE MEIA ONDA .....	35
FIGURA 11–CONCEITO DE DIRETIVIDADE .....	35
FIGURA 12–ANTENA <i>MICROSTRIP</i> .....	37
FIGURA 13–ERROS DE FASE DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO E AZIMUTE .....	39
FIGURA 14–DEDUÇÃO DAS VARIAÇÕES DO CENTRO DE FASE .....	40
FIGURA 15–INTERPRETAÇÃO DO CENTRO DE FASE MÉDIO E VARIAÇÕES ASSOCIADAS .....	41
FIGURA 16–DETERMINAÇÃO DO PCO EM BASE CONHECIDA .....	47
FIGURA 17–DETERMINAÇÃO DO PCO PELO INTERCÂMBIO DE ANTENAS .....	47
FIGURA 18–DETERMINAÇÃO DO PCO PELA ROTAÇÃO DE ANTENAS .....	48
FIGURA 19–CALIBRAÇÃO ABSOLUTA EM CÂMARA ANECÓICA .....	49
FIGURA 20–ROBÔ DE CALIBRAÇÃO .....	52
FIGURA 21–OBSERVAÇÕES NO HEMISFÉRIO DA ANTENA .....	53
FIGURA 22–LINHA DE BASE CONHECIDA NA CALIBRAÇÃO RELATIVA .....	54
FIGURA 23–DETERMINAÇÃO DAS COMPONENTES PLANIMÉTRICAS ABSOLUTAS DO PCO POR MEIO DE ROTAÇÕES DA ANTENA A SER CALIBRADA .....	55
FIGURA 24–DISPOSIÇÃO DOS PILARES NO TERRAÇO DE MEDIÇÕES DO GIK .....	62
FIGURA 25–ORIENTAÇÃO DOS PILARES NO TERRAÇO DE MEDIÇÕES DO GIK .....	63
FIGURA 26–ANTENA TRIMBLE COMPACT L1/L2+GP (TRM22020.00+GP) .....	65
FIGURA 27–ANTENA AOAD/M_T <i>CHOKE RING</i> (TRM29659.00) .....	65
FIGURA 28–RECEPTOR TRIMBLE 4000SSI .....	65
FIGURA 29–COLETORA DE DADOS TRIMBLE TSC1 .....	66
FIGURA 30–ANTENA CINEMÁTICA LEICA AERO ELEMENT (LEIAT502) .....	66
FIGURA 31–ANTENA CINEMÁTICA LEICA AX1202 L1/L2 (LEIAX1202) .....	66
FIGURA 32–RECEPTOR GPS LEICA SR530 .....	67
FIGURA 33–UNIDADE RECEPTORA TRIMBLE 4800 (TRM4800) .....	67
FIGURA 34–UNIDADE RECEPTORA TRIMBLE 5800 (TRM5800) .....	68
FIGURA 35–MECANISMO „DREHRUMBUM“ (DRB) .....	69
FIGURA 36–FUNCIONAMENTO DO PROCESSO DE ROTAÇÃO HORIZONTAL AUTOMATIZADA NA CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GPS PELO MÉTODO RELATIVO .....	71
FIGURA 37–TELA PRINCIPAL DO PROGRAMA AAKDD .....	72
FIGURA 38–RESULTADO DE CALIBRAÇÃO DE ANTENA GPS PELO MÉTODO RELATIVO COM EMPREGO DO PROGRAMA WASOFT-KALIB .....	77
FIGURA 39–MAPA DO EFEITO DE MULTICAMINHO NA ESTAÇÃO .....	79
FIGURA 40–ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA KARL .....	84
FIGURA 41–DETALHES DO DISPOSITIVO DRB .....	85
FIGURA 42–NÍVEL ZEISS DINI 10 .....	86
FIGURA 43–DETERMINAÇÃO DAS DIFERENÇAS DE NÍVEL .....	86
FIGURA 44–NIVELAMENTO GEOMÉTRICO .....	87
FIGURA 45–DISPOSITIVOS DRB E PILARES DE CALIBRAÇÃO .....	88
FIGURA 46–FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO .....	89
FIGURA 47–COMPONENTES NORTE E LESTE DO PCO NA PORTADORA L1 .....	96
FIGURA 48–COMPONENTES NORTE E LESTE DO PCO NA PORTADORA L2 .....	96
FIGURA 49–OFFSET VERTICAL NAS PORTADORAS L1 E L2 .....	97
FIGURA 50–PCV NA PORTADORA L1, ANTENAS LEIAT502 .....	98
FIGURA 51–PCV NA PORTADORA L2, ANTENAS LEIAT502 .....	99
FIGURA 52–PCV NA COMBINAÇÃO LINEAR L3, ANTENAS LEIAT502 .....	99

FIGURA 53–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENAS TRM22020.00+GP, PILAR HPF2.....	100
FIGURA 54–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENAS TRM22020.00+GP, PILAR HPF2.....	101
FIGURA 55–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENAS TRM22020.00+GP, PILAR NPF2.....	101
FIGURA 56–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENAS TRM22020.00+GP, PILAR NPF2.....	102
FIGURA 57–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENAS TRM22020.00+GP, PILARES HPF2 E NPF2 .....	103
FIGURA 58–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENAS TRM22020.00+GP, PILARES HPF2 E NPF2 .....	103
FIGURA 59–ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS OPÇÕES PARA A DETERMINAÇÃO DAS PCV NAS PORTADORAS L1 E L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN5816 .....	104
FIGURA 60–DIFERENÇA ENTRE OS RESULTADOS DAS OPÇÕES PARA A DETERMINAÇÃO DAS PCV NA PORTADORA L1, ANTENAS TRM22020.00 .....	105
FIGURA 61–COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS das OPÇÕES PARA A DETERMINAÇÃO DAS PCV NA PORTADORA L2, ANTENAS TRM22020.00.....	106
FIGURA 62–REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENA LEIAT502, PILAR NPF2 .....	107
FIGURA 63–REPRESENTAÇÃO PLANA DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENA LEIAT502, PILAR NPF2 .....	107
FIGURA 64–TIPOS DE DOMINÂNCIAS DA PCV EM ANTENAS GPS .....	108
FIGURA 65–PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENA TRM22020.00+GP SN5816, PILAR HPF2.....	108
FIGURA 66–PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN5816, PILAR HPF2.....	109
FIGURA 67–COMPARAÇÃO ENTRE CALIBRAÇÕES ABSOLUTAS .....	110
FIGURA 68–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, CALIBRAÇÃO ABSOLUTA (GEO++), ANTENAS TRM22020.00+GP.....	111
FIGURA 69–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, CALIBRAÇÃO ABSOLUTA (GEO++), ANTENAS TRM22020.00+GP.....	111
FIGURA 70–DIFERENÇAS ENTRE PCV NA PORTADORA L1: GEO++, PILAR HPF2, ANTENAS TRM22020.00+GP .....	112
FIGURA 71–DIFERENÇAS ENTRE PCV NA PORTADORA L2: GEO++, PILAR HPF2, ANTENAS TRM22020.00+GP .....	113
FIGURA 72–DIFERENÇAS ENTRE PCV NA PORTADORA L1: GEO++, PILAR NPF2, ANTENAS TRM22020.00+GP .....	113
FIGURA 73–DIFERENÇAS ENTRE PCV NA PORTADORA L2: GEO++, PILAR NPF2, ANTENAS TRM22020.00+GP .....	114
FIGURA 74–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, CALIBRAÇÃO ABSOLUTA NOS PILARES HPF2 E NPF2, ANTENA TRM29659.00 SN7657 ( <i>CHOKE RING</i> ) .....	114
FIGURA 75–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, CALIBRAÇÃO ABSOLUTA NOS PILARES HPF2 E NPF2, ANTENA TRM29659.00 SN7657 ( <i>CHOKE RING</i> ) .....	115
FIGURA 76–VARIANTES DE MODELAGEM DAS PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENAS TRM22020.00+GP SN5816 .....	116
FIGURA 77–VARIANTES DE MODELAGEM DAS PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN5816.....	117
FIGURA 78–VARIANTES DE MODELAGEM DAS PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA COMBINAÇÃO LINEAR L3, ANTENA TRM22020.00 SN5816 .....	117
FIGURA 79–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, CALIBRAÇÃO ABSOLUTA GEO++ .....	118
FIGURA 80–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, CALIBRAÇÃO ABSOLUTA GEO++ .....	119
FIGURA 81–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, CALIBRAÇÃO NO PILAR HPF2 .....	119
FIGURA 82–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, CALIBRAÇÃO NO PILAR HPF2 .....	120

FIGURA 83–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, CALIBRAÇÃO NO PILAR NPF2 .....	120
FIGURA 84–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, CALIBRAÇÃO NO PILAR NPF2 .....	121
FIGURA 85–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR HPF2) NA PORTADORA L1, TRM22020.00+GP SN8692 .....	122
FIGURA 86–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR HPF2) NA PORTADORA L2, TRM22020.00+GP SN8692 .....	122
FIGURA 87–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR NPF2) NA PORTADORA L1, TRM22020.00+GP SN8692 .....	123
FIGURA 88–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR NPF2) NA PORTADORA L2, TRM22020.00+GP SN8692 .....	123
FIGURA 89–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR HPF1) NA PORTADORA L1, TRM29659.00 SN7657 .....	124
FIGURA 90–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR HPF1) NA PORTADORA L2, TRM29659.00 SN7657 .....	125
FIGURA 91–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR NPF1) NA PORTADORA L1, TRM29659.00 SN7657 .....	125
FIGURA 92–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR NPF1) NA PORTADORA L2, TRM29659.00 SN7657 .....	126
FIGURA 93–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENAS TRM22020.00+GP .....	128
FIGURA 94–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENAS TRM22020.00 .....	129
FIGURA 95–PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, PILAR HPF2 .....	130
FIGURA 96–PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, PILAR HPF2 .....	130
FIGURA 97–PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, PILAR NPF2 .....	131
FIGURA 98–PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, PILAR NPF2 .....	131
FIGURA 99–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE PILARES HPF2 E NPF2 NA PORTADORA L1, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555 .....	132
FIGURA 100–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE PILARES HPF2 E NPF2 NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555 .....	133
FIGURA 101–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE PILARES HPF1 E NPF1 NA PORTADORA L1, ANTENA TRM29659.00 SN7657 ( <i>CHOKE RING</i> ) .....	133
FIGURA 102–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE PILARES HPF1 E NPF1 NA PORTADORA L2, ANTENA TRM29659.00 SN7657 ( <i>CHOKE RING</i> ) .....	134
FIGURA 103–COLETORA DE DADOS TRIMBLE TSC1 E RECEPTOR 4000SSI .....	136
FIGURA 104–ANTENA TRM22020.00+GP .....	137
FIGURA 105–ANTENA TRM22020.00-GP .....	137
FIGURA 106–PCV NA PORTADORA L1 PARA DIFERENTES ARQUITETURAS, PILAR HPF2 .....	138
FIGURA 107–PCV NA PORTADORA L1 PARA DIFERENTES ARQUITETURAS, PILAR NPF2 .....	138
FIGURA 108–PCV NA PORTADORA L2 PARA DIFERENTES ARQUITETURAS, PILAR HPF2 .....	139
FIGURA 109–PCV NA PORTADORA L2 PARA DIFERENTES ARQUITETURAS, PILAR NPF2 .....	139
FIGURA 110–COMPONENTE VERTICAL DO PCO NAS PORTADORAS L1 E L2, ANTENA TRM22020.00 SN8918 .....	140
FIGURA 111–COMPONENTE VERTICAL DO PCO NAS PORTADORAS L1 E L2, ANTENA TRM22020.00 SN9555 .....	140

FIGURA 112–COMPONENTES HORIZONTAIS DO PCO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00 SN8918 .....	141
FIGURA 113–COMPONENTES HORIZONTAIS DO PCO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00 SN9555 .....	142
FIGURA 114–PCV DEPENDENTE DE ELEVAÇÃO E AZIMUTE NA FREQUÊNCIA L1, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR NPF2 .....	143
FIGURA 115–PCV DEPENDENTE DE ELEVAÇÃO E AZIMUTE NA FREQUÊNCIA L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR NPF2 .....	143
FIGURA 116–PCV DEPENDENTE DE ELEVAÇÃO E AZIMUTE NA FREQUÊNCIA L1, ANTENA TRM22020.00-GP SN8918, PILAR NPF2 .....	144
FIGURA 117– PCV DEPENDENTE DE ELEVAÇÃO E AZIMUTE NA FREQUÊNCIA L2, ANTENA TRM22020.00-GP SN8918, PILAR NPF2 .....	144
FIGURA 118–PCV DEPENDENTE DE ELEVAÇÃO E AZIMUTE NA FREQUÊNCIA L1 (REPRESENTAÇÃO PLANA), ANTENA TRM22020.00-GP SN8918, PILAR NPF2 .....	145
FIGURA 119–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM5800 SN5278, PILAR HPF2 .....	147
FIGURA 120–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM5800 SN5278, PILAR HPF2 (REPRESENTAÇÃO PLANA) .....	147
FIGURA 121– PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENA TRM4800 SN4859, PILAR HPF1 .....	148
FIGURA 122– DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE PILARES HPF1 E NPF1 NA PORTADORA L1, ANTENA TRM29659.00 SN7657 ( <i>CHOKE RING</i> ) .....	149
FIGURA 123–CONSTRUÇÃO ELEVADA COM ADAPTADOR SFB .....	151
FIGURA 124–CONSTRUÇÃO BAIXA COM ADAPTADOR CURTO .....	151
FIGURA 125–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO, ADAPTADOR CURTO, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR HPF1 .....	152
FIGURA 126–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO, ADAPTADOR LONGO, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR HPF1 .....	152
FIGURA 127–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO, ADAPTADOR CURTO, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR HPF2 .....	153
FIGURA 128–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO, ADAPTADOR LONGO, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR HPF2 .....	154
FIGURA 129–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO, ADAPTADOR CURTO, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR NPF2 .....	154
FIGURA 130–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO, ADAPTADOR LONGO, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR NPF2 .....	155
FIGURA 131–OBSERVAÇÕES DO DIA 16/07/2005, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR HPF2, ADAPTADOR CURTO, CABO 30 METROS .....	156
FIGURA 132–OBSERVAÇÕES DO DIA 17/07/2005, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR HPF2, ADAPTADOR CURTO, CABO 10 METROS .....	157
FIGURA 133–OBSERVAÇÕES DO DIA 13/07/2005, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR HPF2, ADAPTADOR LONGO, CABO 30 METROS .....	157
FIGURA 134–OBSERVAÇÕES DO DIA 21/07/2005, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR NPF2, ADAPTADOR LONGO, CABO 30 METROS .....	158
FIGURA 135–REPRESENTAÇÃO DA RAZÃO SINAL-RUÍDO (SNR) .....	159
FIGURA 136–COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DA RAZÃO SINAL-RUÍDO .....	161
FIGURA 137–CAMPUS DO CENTRO POLITÉCNICO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. DETALHE: LABORATÓRIO DE GEODÉSIA ESPACIAL (LAGE) .....	163
FIGURA 138–LABORATÓRIO DE GEODÉSIA ESPACIAL (ESQUERDA) E OBSERVATÓRIO ASTRONÔMICO COM AUDITÓRIO ANEXO (DIREITA) .....	164
FIGURA 139–LAJE DE COBERTURA DO AUDITÓRIO .....	164
FIGURA 140–CORTE TRANSVERSAL DOS PILARES DE CALIBRAÇÃO .....	165
FIGURA 141–PILAR DE CALIBRAÇÃO (PILAR 1000 – OESTE) .....	166
FIGURA 142–PONTO DE CONTROLE DE NÍVEL .....	167
FIGURA 143–DESLOCAMENTOS VERTICAIS NA ESTRUTURA DO EDIFÍCIO DA 1ªBCALBR .....	168
FIGURA 144–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO NO PILAR 1000 (OESTE), ANTENA TRM22020.00-GP .....	170
FIGURA 145–DIAGRAMA DE OBSTRUÇÕES DO HORIZONTE VISÍVEL A PARTIR DOS PILARES 1000 (OESTE) E 2000 (NORTE) .....	171

FIGURA 146–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO NO PILAR 2000 (NORTE), ANTENA TRM22020.00-GP .....	171
FIGURA 147–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO NO PILAR 1000 (OESTE), ANTENA LEIAT504 ( <i>CHOKE RING</i> ) .....	172
FIGURA 148–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO NO PILAR 2000 (NORTE), ANTENA LEIAT504 ( <i>CHOKE RING</i> ) .....	172
FIGURA 149–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO NA ESTAÇÃO PARA, ANTENA TRM22659.00 ( <i>CHOKE RING</i> ) .....	173
FIGURA 150–VALORES DA SNR NORMALIZADOS NA PORTADORA L1, ANTENA TRM22020.00-GP, PILAR 1000 .....	174
FIGURA 151–VALORES DA SNR NORMALIZADOS NA PORTADORA L1, ANTENA TRM22020.00-GP, PILAR 2000 .....	174
FIGURA 152–COMPARAÇÃO DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA, PILAR 2000, ANTENA TRM22020.00+GP .....	177

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – CARACTERÍSTICAS DO GPS, GLONASS E GALILEO .....	11
QUADRO 2 – INFLUÊNCIA DOS ERROS NO POSICIONAMENTO RELATIVO (SEM S/A) .....	18
QUADRO 3 – ERROS SISTEMÁTICOS PRESENTES NAS OBSERVAÇÕES GPS .....	18
QUADRO 4 – FORMATO DOS ARQUIVOS DE CORREÇÃO .....	59
QUADRO 5 – INSTITUIÇÕES ALEMÃS E MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GNSS .....	61
QUADRO 6 – DIMENSÃO DOS PILARES .....	64
QUADRO 7 – IDENTIFICAÇÃO DAS ANTENAS E RECEPTORES .....	68
QUADRO 8 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE PROCESSAMENTO COM OS MÓDULOS DO PROGRAMA WASOFT-KALIB .....	74
QUADRO 9 – PANORAMA DOS FORMATOS DE CORREÇÃO .....	76
QUADRO 10 – INTENSIDADE DO EFEITO DE MULTICAMINHO .....	80
QUADRO 11 – PANORAMA DAS CALIBRAÇÕES DE ANTENAS GPS REALIZADAS NO GIK .....	83
QUADRO 12 – SEQUÊNCIA DE ORIENTAÇÃO AUTOMÁTICA DA ANTENA .....	88
QUADRO 13 – FLUXOGRAMA DO PROCESSAMENTO DA CALIBRAÇÃO .....	90
QUADRO 14 – PANORAMA DOS LEVANTAMENTOS PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DO SINAL GPS .....	92
QUADRO 15 – PCO DE REFERÊNCIA .....	97
QUADRO 16 – DESCRIÇÃO DAS VARIANTES DE MODELAGEM DAS PCV .....	116
QUADRO 17 – INFLUÊNCIA DO PLANO DE TERRA: ANTENAS E RECEPTORES .....	135
QUADRO 18 – DADOS DO NIVELAMENTO .....	136
QUADRO 19 – DIFERENÇAS NA COMPONENTE VERTICAL DO PCO ANTE A MODIFICAÇÃO DA ARQUITETURA E DO ENTORNO DAS ANTENAS TRM22020.00 .....	142
QUADRO 20 – DIFERENÇA DE DESNÍVEL (1ª DETERMINAÇÃO) .....	168
QUADRO 21 – ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA PERMANENTES EMPREGADAS PARA A AVALIAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO NA 1ªBCALBR .....	169
QUADRO 22 – COORDENADAS (UTM, WGS84) DA ANTENA TRM22020.00+GP .....	176



## RESUMO

O propósito deste trabalho é propor e investigar um método de calibração de antenas de receptores GNSS para a Primeira Base de Calibração de Antenas GNSS no Brasil (1ªBCALB). Foram realizados experimentos fundamentados em medições geodésicas e processamento computacional visando a calibração de antenas GPS, de diferentes modelos, via método de calibração relativo em campo. Os experimentos foram realizados no Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe. As correções do centro de fase (PCO e PCV) das antenas foram determinadas empregando programas específicos e devidamente representadas em diagramas de fase por meio de rotinas computacionais. As antenas Trimble modelo TRM22020.00+GP possuem centro de fase eletrônico mais estável comparado ao das antenas Leica modelo LEIAT502, as quais são mais vulneráveis ao efeito de multicaminho. A partir de levantamentos com diferentes equipamentos GPS, os resultados foram analisados visando detectar a influência causada pela alteração do entorno da estação nos resultados de calibração, para os quais se obtiveram diferenças de até 6 mm na componente vertical do PCO quando do emprego de diferentes pilares. Comprovou-se que as antenas GPS testadas possuem comportamento eletrônico distinto e estão sujeitas às influências do entorno da estação, e.g., o efeito de multicaminho dos sinais, que alteram a característica de recepção das antenas GPS e causam erros de até 1 cm no PCO. O efeito de multicaminho foi investigado considerando diferentes alturas da antena, objetivo que foi alcançado com o uso de dois adaptadores de diferentes comprimentos e um programa computacional para a detecção, localização e quantificação deste efeito. Foram realizados estudos acerca dos valores da razão sinal-ruído (SNR) de observações conduzidas em diferentes cenários. Mostrou-se que a SNR pode ser uma ferramenta para avaliar a qualidade das observações GPS. No Brasil, foram realizadas investigações preliminares em dois pilares geodésicos, edificadas na cobertura do auditório anexo ao observatório astronômico da Universidade Federal do Paraná. Estes pilares constituem parte da 1ªBCALBR a ser estabelecida segundo diretrizes internacionais para levantamentos geodésicos de alta precisão. Inerente à construção dos pilares está a monitoração da estrutura do edifício no qual os pilares foram construídos, tarefa de extrema importância para garantir a confiabilidade dos levantamentos. Foram empregados receptores e antenas geodésicas para a realização dos primeiros rastreios na 1ªBCALBR. Os dados foram usados para a realização das primeiras análises de multicaminho e emprego de valores de correção do centro de fase de antenas. Mostrou-se que a aplicação de correções do centro de fase de diferentes origens no pós-processamento causou diferenças de até 1 cm na coordenada vertical.

Palavras chave: calibração de antenas GNSS, calibração de antenas GPS, efeito de multicaminho, razão sinal-ruído, SNR.

## ABSTRACT

The purpose of this work is to investigate a GNSS antenna calibration method to be introduced in the first GNSS antenna calibration base in Brazil (called 1<sup>a</sup>BCALBR). Geodesic measurements were carried out in the Institute of Geodesy of the University of Karlsruhe aiming at the calibration of GPS antennas. Different antenna models were calibrated through relative field calibration. Phase center corrections (PCO and PCV) were estimated using specific programs. The phase center diagrams were outlined with computational routines. It was revealed that the Trimble antennas TRM22020.00+GP have homogeneous electronic behavior in comparison to the Leica antennas LEIAT502, which is more vulnerable to multipath effect. The calibration results were analyzed aiming at the detection of influences caused by modifications in the vicinities of the GPS station. Differences of up to 6 mm in the vertical component of the PCO are evident for measurements carried out on different pillars. The tested antennas exhibited distinct electronic behavior. They are sensitive to all influences of station vicinities, e.g., multipath effect, that causes error of up to 1 cm in the PCO. The multipath effect was investigated considering different antenna heights. Two adapters of different lengths were used to simulate different antenna heights. The detection, localization and quantification of this effect were performed by using specific software. Studies concerning the signal to noise-ratio (SNR) values as a tool to evaluate the quality of GPS measurements were carried out considering different scenarios. In Brazil, preliminary measurements on two geodesic pillars were carried out. These pillars were built on the roof top of the astronomical observatory of the Federal University of Paraná. They were built according to international guidelines and constitute part of the 1<sup>a</sup>BCALBR to be established for geodesic purposes. Inherent to the construction of these pillars is the vertical monitoring of the building, which is of great importance to assure geodetic measurements with high precision. The first measurements on the 1<sup>a</sup>BCALBR were carried out for multipath analysis as well the use of antenna phase center corrections to investigate changes in the coordinates. The introduction of antenna phase center corrections from different sources cause differences of up to 1 cm in the vertical coordinate.

**Keywords:** GNSS antenna calibration, GPS antenna calibration, multipath effect, signal-to-noise ratio, SNR.

## ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel dieser Arbeit ist, ein GNSS-Antennenkalibrierungsverfahren für die erste Kalibrierstation in Brasilien (1<sup>a</sup>BCALBR) zu entwickeln und zu untersuchen. Die Messungen wurden mit verschiedenen Antennentypen mittels relativer Feldkalibrierung am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (TH) durchgeführt. Die Phasenzentrumskorrekturen der Antennen wurden mit speziellen Programmen modelliert und mittels Phasendiagrammen dargestellt. Es konnte festgestellt werden, dass die Trimble Antennen TRM22020.00+GP ein homogenes Verhalten aufweisen, beispielsweise im Gegensatz zu den Leica LEIAT502 Antennen, die i.d.R. anfälliger auf Mehrwegeeffekteinflüsse sind. Basierend auf Messungen ausgeführt mit verschiedenen GPS-Ausrüstungen, wurden die Resultate von Antennenkalibrierungen analysiert, um die Einflüsse geänderter Umgebungsbedingungen der Kalibrierstation auf die Kalibrierergebnisse zu untersuchen. Hierzu wurden Kalibrierungen auf zwei verschiedenen Pfeilern durchgeführt und Antennenmodelle bestehend aus Phasenzentrumsoffset und –variationen geschätzt. Dabei konnten Differenzen von bis zu 6 mm für die Höhenkomponente ermittelt werden. Die untersuchten Antennen weisen eine unterschiedliche Empfangscharakteristik auf und reagieren auf verschiedene Art und Weise auf Umgebungseinflüsse wie Mehrwegeeffekte, woraus sich z.B. für die Phasenzentrumsoffsets Abweichungen von bis 1 cm ergeben. Die Einflüsse von Mehrwegeeffkten wurden detektiert, lokalisiert und quantifiziert in dem Kalibrierungen und GPS-Beobachtungen analysiert wurden, die beispielsweise unter Verwendung verschiedener Antennenhöhen oder unterschiedlicher Adaptersysteme registriert wurden. Im Speziellen wurde hierzu die Signalstärke (Maßzahl: Signal-zu-Rausch-Verhältnis) verwendet. Diese Maßzahl scheint außerordentlich gut geeignet zur Beurteilung der GPS-Datenqualität. Die in Deutschland erarbeiteten Strategien und gewonnen Erkenntnisse wurden anschließend an die in Brasilien vorherrschenden Gegebenheiten übertragen und angepasst. Anschließend wurden erste Voruntersuchungen zur praxisnahen Erprobung und zur Erlangung eines vertieften Erfahrungsgewinns geplant und durchgeführt. Hierzu wurden nach internationalen Richtlinien auf dem Messdach des LAGE zwei geodätische Pfeiler errichtet, die künftig einen Teil der für geodätische Messungen einzurichten 1<sup>a</sup>BCALBR bilden. Verbunden mit der Etablierung der Pfeiler ist nach ersten Erkenntnissen die Absenkung den Fundamente des LAGE-Gebäudes. Eine nachhaltige Überwachung dieser Bewegung sehr wichtig zur Garantierung von zuverlässigen GPS-Kalibriervermessungen. Abschließend wurden erste Messungen auf dem 1<sup>a</sup>BCALBR durchgeführt. Die Daten wurden erstmalig hinsichtlich Mehrwegeeffekten analysiert und zur Bestimmung von Antennenphasenzentrumskorrekturen verwendet. Die Berücksichtigung dieser Phasenzentrumskorrekturen im Rahmen von GPS-Basislinienauswertungen kann Unterschiede von bis zu ca. 1 cm der Höhenkomponente vergleichend zu Standardantennenmodellen verursachen.

Schlüsselwort: GNSS-Antennenkalibrierung, GPS-Antennenkalibrierung, Mehrwegeeffekt, SNR.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES SOBRE O TEMA: DEFINIÇÃO, DELIMITAÇÃO E IMPORTÂNCIA

As fontes de erros nos posicionamentos com o NAVSTAR–GPS (ingl. *Navigation System with Time and Ranging – Global Positioning System*) podem ser classificadas conforme três principais origens: satélites, atmosfera e estação terrestre. Um dos erros da estação que causam alterações no posicionamento geodésico são as variações do centro de fase da antena do receptor, ocasionadas pelo deslocamento do centro de fase a partir do eixo central da antena, condicionado por uma parte mecânica e outra parte eletrônica.

Do ponto de vista eletrônico, as características construtivas da antena dos receptores GNSS (ingl. *Global Navigation Satellite System*) são baseadas em complexos estudos do comportamento de recepção do sinal. O ponto de recepção em uma antena, denominado centro de fase eletrônico, é uma grandeza geométrica que normalmente não coincide com o centro geométrico da antena. A posição do centro de fase é uma função da direção dos sinais incidentes, das características individuais da antena e da influência da instrumentação geodésica ou de objetos localizados na proximidade dos instrumentos. Esta dependência fundamenta o princípio das variações do centro de fase (ingl. *phase center variations – PCV*), cuja modelagem é obtida via calibração.

A calibração de antenas GPS pode ser realizada de duas formas: absoluta ou relativa. Estes métodos ainda não foram explorados no país, havendo pesquisas apenas no âmbito internacional. Este trabalho contribuirá para a introdução de um tema imprescindível para a análise das potencialidades e restrições inerentes à calibração de antenas GNSS, abrindo novas perspectivas para o desenvolvimento de um tema inédito no país e de extrema importância para o aprimoramento do posicionamento preciso por satélites.

As atuais pesquisas no âmbito da calibração de antenas GNSS se concentram nos estudos para a determinação das variações do centro de fase da antena receptora. SCHMITZ e WÜBBENA (2001) apresentaram estudos sobre a influência do entorno da estação na posição do centro de fase de antenas geodésicas. Na calibração absoluta foram empregadas técnicas automatizadas para a separação do efeito de multicaminho das observações de fase da portadora e a determinação dos parâmetros de calibração (WÜBBENA et al., 2006a e 2006b). BÁNYAI (2005) apresentou uma estratégia de rotação da antena para a determinação das coordenadas do deslocamento (ingl. *offset*) do centro de fase médio. A fim de caracterizar a qualidade de diferentes tipos de antenas, GÖRRES et al. (2006) realizaram comparações entre resultados de calibração em câmara anecóica e calibração absoluta em campo. Com respeito ao emprego de correções de antenas determinadas via métodos de calibração, cita-se RÓZSA et al. (2005), que aplicaram correções absolutas do centro de fase no processamento de dados GPS para a monitoração de deslocamentos em áreas sísmicas.

Associado à calibração de antenas GNSS, outro assunto de atual importância no cenário mundial é o efeito de multicaminho dos sinais. No Brasil, trabalhos de pesquisa como FARRET (2000) e SOUZA et al. (2005) apresentam análises para detecção e redução do efeito de multicaminho. No entanto, não existem estudos relacionados à calibração de antenas de receptores GNSS. Conforme WÜBBENA et al. (2000b, p. 2), o efeito de multicaminho e as PCV das antenas receptoras são os principais erros dependentes da estação que influenciam o posicionamento GNSS preciso. WANNINGER (2002b) propõe procedimentos para a redução da influência do efeito de multicaminho por meio de técnicas de detecção, localização e quantificação do multicaminho nas observações de fase da portadora. O tratamento destes erros, a exemplo da rede de estações de referência ativa da Alemanha (SAPOS<sup>1</sup>), tem proporcionado soluções de posicionamento mais precisas (BÖDER et al., 2001, p. 2).

---

<sup>1</sup>SAPOS (*Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung*): Projeto dos Departamentos de Agrimensura e Geodésia dos Estados da República Federal da Alemanha que oferece serviços de posicionamento em tempo real com base no GNSS. A avaliação do efeito de multicaminho nestas estações não é realizada neste trabalho.

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho se deu em vista da inexistência de investigações do tema no Brasil, ainda que seja de extrema importância para o melhoramento do posicionamento geodésico preciso. Buscou-se, mediante a experiência e os conhecimentos obtidos internacionalmente, em especial através das investigações realizadas no Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe, apresentar um método de calibração de antenas GPS no Brasil e concretizar o estabelecimento da primeira base de calibração de antenas de receptores GNSS.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A calibração de antenas GNSS e o estudo das influências associadas ao efeito de multicaminho são tratados internacionalmente que devem ser introduzidos no país, principalmente quando se almeja obter posicionamento preciso.

O Brasil conta com a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), administrada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As 25 estações da RBMC desempenham importância fundamental no provimento de dados para fins geodésicos, proporcionando observações de qualidade e confiabilidade. Nesse aspecto, a vantagem da RBMC é que suas estações fazem parte da Rede de Referência do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), cujas coordenadas finais têm precisão da ordem de  $\pm 5$  mm, configurando-se como uma das redes mais precisas do mundo (IBGE, 2007). Na atualidade, é possível empregar valores de calibração para as antenas dos receptores da RBMC acessando as correções de grupo publicadas pelo serviço norte-americano *National Geographic Service* (NGS), as quais são recomendadas pelo IBGE. Estas correções consistem de valores médios de calibração que desconsideram, portanto, as características individuais das antenas. Ademais, estas correções são incompletas por não incluírem as PCV dependentes de azimuth. Considerando o estado-da-arte no desenvolvimento da tecnologia de antenas GNSS e a importância de abranger as PCV em sua complexidade, constata-se a necessidade da realização de uma futura calibração das antenas da RBMC.

Atualmente, verifica-se no Brasil a existência de redes GPS geridas por outros órgãos e instituições, e.g., a Rede Manfra de Estações de Monitoramento Contínuo de GPS, a Rede Incra de Bases Comunitárias do GPS (RIBaC) e o Sistema de Bases GPS Santiago&Cintra. Sejam elas regionais ou nacionais, públicas ou comerciais, faz-se necessário que sejam obedecidos critérios técnicos definidos pelo IBGE para homologação e integração destas estações ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Desta forma, justifica-se rever estes critérios em vista da necessidade de incluir a análise da qualidade das observações destas redes considerando, por exemplo, a influência do efeito de multicaminho na estação e o exame da relação sinal-ruído (ingl. *signal-to-noise ratio* – *SNR*) nas observações.

Em vista da evolução dos processos de calibração de antenas de receptores GNSS e da inexistência de oferta desses serviços na maioria dos países da América Latina, inclusive no Brasil, tornou-se imprescindível a apresentação de um método de avaliação do centro de fase das antenas dos receptores GNSS visando o estabelecimento da primeira base de calibração desses instrumentos no Brasil. Atualmente, o emprego de diferentes tipos de antenas para determinação de linhas de base longas tem intensificado a demanda por correções absolutas das PCV (SCHMITZ, 2001, p. 101). Dadas as dimensões continentais do Brasil, há de se propor um método que proporcione a dedução de correções absolutas do centro de fase das antenas de receptores GNSS.

Com a disponibilidade de uma base de calibração de antenas de receptores GNSS no Brasil, serão beneficiadas várias experiências científicas, por exemplo o estudo da constelação GNSS em diferentes hemisférios do globo. Há a necessidade de se iniciar a calibração de antenas GNSS no Brasil a fim de averiguar diferenças significativas para os resultados obtidos nas calibrações realizadas na Europa, uma vez que a situação relativa dos satélites é distinta nos dois hemisférios.

Atualmente, organismos internacionais de padronização, e.g., a Organização Internacional de Padronização (ingl. *International Organization for Standardization* – *ISO*) buscam prover a sociedade de conhecimento sistematizado que visa atender, por meio de documentos normativos, as demandas de inserção internacional. Já está

disponível nas normas da ISO uma seção acerca da avaliação de equipamentos destinados às aplicações de posicionamento cinemático em tempo real (ingl. *Real Time Kinematic - RTK*), para as quais já existem instruções normativas para a calibração e teste das antenas. Todavia, não se encontram ainda tais especificações ou quaisquer referências sobre este assunto no Brasil.

### 1.3 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS NA PESQUISA

Nas medições realizadas no Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (Alemanha) empregaram-se antenas e receptores GPS de diversos modelos. As medições foram realizadas via método relativo com emprego de um suporte rotativo para a orientação da antena em azimutes programados. Empregou-se o programa Wasoft/Kalib (WANNINGER, 2001) para a avaliação do processo de calibração das antenas. As variações do centro de fase e o estudo dos valores da razão sinal-ruído foram analisados por meio de gráficos, gerados por rotinas escritas no programa MATLAB. A detecção, localização e quantificação do efeito de multicaminho foram conduzidas com emprego do programa Wasoft/Multipath (WANNINGER, 2003).

No Brasil, as investigações foram conduzidas em dois pilares geodésicos edificadas na cobertura do auditório anexo ao observatório astronômico da Universidade Federal do Paraná. Estes pilares foram construídos com a finalidade de constituir a Primeira Base de Calibração de Antenas GNSS no Brasil (1ªBCALBR). Foram empregados receptores e antenas geodésicas para a realização dos primeiros rastreios. As análises do efeito de multicaminho nas estações e da relação sinal-ruído das observações foram realizadas nos moldes dos experimentos conduzidos na Alemanha.



## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é investigar e propor um método de calibração de antenas de receptores GNSS para a consecução da primeira base de calibração a ser estabelecida no Brasil. Este objetivo será alcançado com a tecnologia adquirida na Alemanha, por meio dos experimentos realizados junto ao Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe, dos resultados alcançados e das análises efetuadas.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Obter modelos que descrevem ou caracterizam o centro de fase de algumas antenas de receptores GPS via procedimentos de calibração relativa em campo e processamento dos dados;
- b) analisar o efeito de multicaminho dos sinais nos resultados de calibração;
- c) investigar a influência do entorno da antena GPS receptora por meio da razão sinal-ruído;
- d) procurar separar os efeitos que influenciam as PCV advindas de diferentes meios, e.g., a arquitetura da antena, a forma e superfície do pilar e o entorno da estação;
- e) transferir para o Brasil a tecnologia de calibração de antenas GNSS adquirida na Alemanha;
- f) estabelecer a Primeira Base de Calibração de Antenas GNSS no Brasil (1ªBCALBR);
- g) apresentar os primeiros resultados da influência do efeito de multicaminho e da análise da razão sinal-ruído nas observações realizadas na 1ªBCALBR;
- h) introduzir as correções de calibração relativa (item a) no processamento das observações realizadas nos marcos que compõem a 1ªBCALBR, analisando a influência destas correções na obtenção de coordenadas precisas.

- i) examinar as deformações verticais na estrutura da edificação do observatório astronômico decorrentes da construção da 1ªBCALBR;
- j) propor um método de calibração de antenas GNSS na 1ªBCALBR mediante os conhecimentos adquiridos na Alemanha.

## 1.5 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa traz contribuições científicas ao país por meio da transferência de uma tecnologia em evidência internacional. A introdução do método de calibração de antenas GNSS no Brasil – e na América Latina – é inédita e contribui sobremaneira para o aprimoramento do posicionamento geodésico preciso.

O estabelecimento da primeira base de calibração de antenas GNSS no Brasil, embasado nos conhecimentos adquiridos na Alemanha, nos experimentos realizados e nos resultados alcançados neste país, é outra das contribuições que se descortina com esta pesquisa.

A idealização dos pilares que compõem a primeira base de calibração de antenas GNSS no Brasil é uma contribuição que pode servir de modelo para o estabelecimento de outras bases de calibração. Inerente à construção dos pilares está a monitoração dos fundamentos do edifício no qual os pilares foram construídos, tarefa de extrema importância para garantir a confiabilidade dos levantamentos geodésicos. Estas práticas podem ser reproduzidas em futuros trabalhos, com base nestas experiências adquiridas na Alemanha, e constituem, portanto, grande contribuição ao país.

Vislumbra-se uma futura contribuição no sentido de introduzir mecanismos de avaliação da conformidade com as normas determinadas pela Organização Internacional de Padronização (ISO), reconhecidas e aplicadas internacionalmente, e que em breve deverão ser exigidas no Brasil.

## 1.6 ESTRUTURAÇÃO

Esta pesquisa está dividida em seis capítulos. No capítulo 2 é apresentada uma revisão de literatura contendo generalidades sobre o NAVSTAR-GPS, enfocando as fontes de erros no posicionamento, as características das antenas dos receptores GPS e os métodos de calibração de antenas GPS. No capítulo 3 são apresentados os equipamentos e programas empregados nos experimentos de calibração realizados no Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (TH). É mostrada a forma como foram organizados e processados os dados de observação desde a preparação dos arquivos RINEX até o cálculo e obtenção dos valores de calibração das antenas GPS. No capítulo 4 encontram-se as análises dos resultados obtidos a partir dos experimentos realizados na Alemanha e algumas considerações a respeito da qualidade do sinal considerando a problemática do efeito de multicaminho. No capítulo 5 são descritas as diligências estabelecidas para a realização dos experimentos no Brasil. São apresentados os resultados preliminares do processamento das coordenadas com a aplicação de correções do centro de fase da antena. Também são apresentadas as primeiras análises da influência do efeito de multicaminho nos pilares e o estudo da razão sinal-ruído. A conclusão e as recomendações para atividades futuras são mencionadas no capítulo 6.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 GENERALIDADES SOBRE O NAVSTAR-GPS

#### 2.1.1 NAVSTAR-GPS

O NAVSTAR-GPS (ingl. *NAVigation System with Time And Ranging – Global Positioning System*) foi concebido como um sistema de navegação para fins militares. Seu desenvolvimento foi iniciado desde 1973 pelo Ministério de Defesa dos EUA a fim de prover o posicionamento tridimensional, a velocidade e informações precisas de tempo, independente de condições meteorológicas (SEEBER, 2003, p. 212).

A partir de 1983 foi iniciada sua aplicação para soluções geodésicas e em março de 1994 o sistema foi declarado operacionalmente completo com 21 satélites (mais três satélites em reserva ativa) distribuídos em seis planos orbitais, com uma altura orbital média de 20200 km, inclinados de 55° em relação ao plano do equador com um período orbital de 12 horas siderais, de modo que pelo menos quatro satélites sejam visíveis simultaneamente acima do horizonte, em qualquer lugar da superfície da Terra, e em qualquer instante (SEEBER, 2003, p. 211).

O GPS é estruturado em três segmentos: espacial, de controle e de usuário. O segmento espacial consiste na constelação de satélites GPS, que transmitem à Terra sinais modulados em duas frequências ( $L_1=1575,42$  MHz e  $L_2=1227,60$  MHz). Na frequência  $L_1$  são modulados o código preciso P e o código C/A, enquanto na frequência  $L_2$  apenas o código P (LEICK, 1995, p. 60). Na concepção original, três gerações de satélites constituem a constelação GPS, denominados blocos I, II/IIA e IIR (SEEBER, 2003, p. 214). Em 16 dezembro de 2005 foi posto em operação o primeiro satélite da nova versão dos satélites do bloco IIR (LANGLEY, 2006), denominada IIR-M, que inclui um novo código modulado na portadora  $L_2$ , denominado  $L_{2C}$  (FENTON, 2006, p. 22). Como parte do programa de modernização do GPS (HOTHEM, 2006) está prevista uma quarta geração de satélites, denominada II-F,

planejada para também comportar o código  $L_{2C}$  na portadora  $L_2$  e um novo sinal  $L_5$  com frequência de 1176,45 MHz (SEEBER, 2003, p. 233).

O segmento de controle é o responsável pela operação do sistema GPS, sendo constituído por uma estação de controle central (*Master Control Station - MCS*), diversas estações monitoras localizadas ao redor do globo terrestre e antenas terrestres para a transmissão de dados aos satélites. O segmento de controle operacional (OSC) consiste da estação de controle central em Colorado Springs (Estados Unidos) e seis estações monitoras (Hawaii, Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein, Colorado Springs e Cabo Canaveral), três das quais realizam a transferência de informações aos satélites (SEEBER, 2003, p. 217). A inclusão de cinco novas estações do NIMA – Equador, Argentina, Bahrain, Austrália e Reino Unido – expandiu a capacidade operacional e a integridade do sistema (YINGER et al., 2003).

O segmento de usuário compreende todas as classes de receptores GPS e seus componentes, que em geral são classificados em receptores geodésicos e de navegação (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001, p. 11-23). O primeiro receptor para fins geodésicos foi lançado em 1982 e possuía seis canais na frequência  $L_1$  (WELSCHE et al., 1986, p. 434). Atualmente, são disponíveis cerca de 527 tipos de receptores geodésicos (GPS WORLD, 2006) com capacidade de adquirir sinais em uma ou duas frequências a partir de satélites NAVSTAR-GPS ou GLONASS (ingl. *Global Navigation Satellite System*) (seção 2.1.2). Receptores modernos já possuem recursos de interoperabilidade, i.e., recebem sinais das duas constelações.

### 2.1.2 Desenvolvimentos do Futuro GNSS

GNSS (ingl. *Global Navigation Satellite System*) é a denominação dos sistemas baseados em satélites artificiais que proporcionam dados de navegação em tempo real bem como serviços de posicionamento geográfico em diversos níveis de precisão. Embora tenha sido propagado sob a sigla genérica GPS (*Global Positioning System*), o NAVSTAR-GPS está incluído no conceito de GNSS assim como a constelação russa GLONASS. Também inserido no GNSS está o projeto europeu GALILEO, que é a resposta europeia aos dois sistemas existentes.

O GALILEO é um sistema de posicionamento e navegação por satélites artificiais, empreendido por uma cooperação entre a Comissão Europeia e a Agência Espacial Europeia (ESA), com sede em Bruxelas, para gerenciar a fase de desenvolvimento do GALILEO (EISFELLER, 2002, p. 29). Com funcionamento previsto para 2010, o GALILEO será estruturado em cinco serviços, concebidos conforme as necessidades dos diferentes grupos de usuários (DAVID, 2005, p. 327): o serviço aberto (ingl. *open service* – OS), o serviço comercial (ingl. *commercial service* – CS), o serviço de segurança à vida (ingl. *safety of life service* – SoL), o serviço de controle público (ingl. *public regulated service* – PRS) e o serviço de resgate e salvamento (ing. *search and rescue service* – SAR).

QUADRO 1 – CARACTERÍSTICAS DO GPS, GLONASS E GALILEO

	GPS	GLONASS	GALILEO
Início desenvolvimento	1973	1972	2001
1º satélite lançado	27/06/1977	12/10/1982	28/12/2005
Constelação completa	21 + 3	21 + 3	27 + 3
Constelação (11/11/06)	29	16	1
Planos orbitais	6	3	3
Inclinação	55°	64,8°	56°
Altura da órbita	20.180 km	19.100 km	23.222 km
Período	11h 58 min	11h 15 min	~14 h
Datum geodésico	WGS84	SGS85	GTRF
Sistema de tempo	Tempo GPS	Tempo GLONASS	GALILEO (GST)
Característica do sinal	Identificação por código	Identificação por frequência	Identificação por código
Frequências	L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> , (L <sub>5</sub> )	L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> , (L <sub>5</sub> )	E <sub>5a</sub> , E <sub>5b</sub> , E <sub>6</sub> , E <sub>2</sub> -L <sub>1</sub> -E <sub>1</sub>
Códigos	Diferente para cada satélite	Idêntico para cada satélite	Diferente para cada satélite
Influências artificiais no sistema	S/A (até 05/2001); AS	nenhuma	Sinais PRS serão restritos.

Fonte: RÜFFER e HEMMERT, 2005, p. 523.

Nota: traduzido e adaptado pelo autor.

O segmento terrestre do GALILEO será composto por 40 estações (BADSTÜBNER, 2005, p. 571) e o segmento espacial consistirá de 30 satélites (27 + 3 satélites de reserva), orbitando em três planos orbitais com período aproximado de 14 horas e uma distância próxima a 23.222 km da superfície da Terra (DINWIDDY et al., 2001). Os sinais transmitidos estão nas bandas de frequência E5a e E5b (1.164-1.215 MHz), E6 (1.215-1.300 MHz) e E2-L1-E1 (1.559-1.592 MHz). Ao contrário do

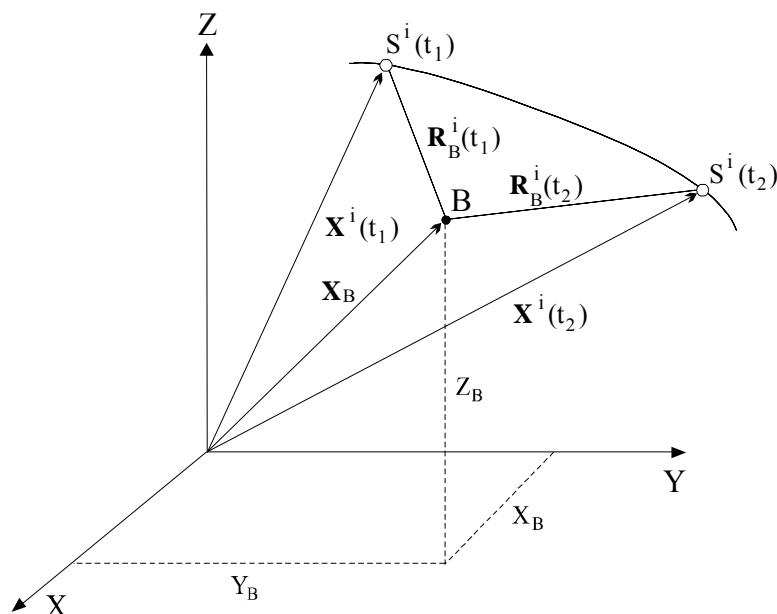
GPS e GLONASS, o GALILEO será essencialmente um sistema para uso civil. No quadro 1 estão relacionadas algumas das principais características dos três sistemas.

O lançamento do segundo satélite da constelação GALILEO, o GIOVE-B, está previsto para acontecer em 2007 (FALCONE et al., 2006, p. 35). Do ponto de vista político, o GALILEO representa um passo para a autonomia europeia e demais países que dependem dos Estados Unidos em termos de posicionamento por satélites. Tecnicamente, o GALILEO proporcionará pesquisas científicas do movimento do pólo e determinação da rotação da Terra e melhorias na precisão da navegação autônoma e operabilidade, proporcionadas pela interoperabilidade com o GPS e com o GLONASS.

### 2.1.3 Princípio do Posicionamento por Satélites

A apresentação geométrica para o posicionamento de um ponto na superfície terrestre por meio de satélites é observada na figura 1.

FIGURA 1—GEOMETRIA DO POSICIONAMENTO POR SATÉLITES



Fonte: SEEBER (1993, p. 248).

Nota: adaptado pelo autor.

O princípio para determinação de coordenadas com o GPS é baseado na medição das chamadas pseudodistâncias<sup>2</sup> entre a antena de um receptor e as antenas de quatro satélites. A partir das coordenadas conhecidas destes satélites, referenciadas a um sistema de referência<sup>3</sup>, é possível determinar as coordenadas de um ponto na superfície terrestre (SEEBER, 1993, p. 209). Dados uma antena e um receptor instalados em uma estação  $B$  e um satélite  $i$ , a equação fundamental de observação para uma pseudodistância é (SEEBER, 2003, p. 252):

$$PR_B^i(t) = |\mathbf{X}^i - \mathbf{X}_B| + c\delta t_B = c\tau_B^i = ((X^i - X_B)^2 + (Y^i - Y_B)^2 + (Z^i - Z_B)^2)^{\frac{1}{2}} + c\delta t_B \quad (2.1)$$

onde:

- $PR_B^i$  : Pseudodistância entre a antena do satélite  $i$  e a antena do receptor em  $B$ ;
- $t_B$  : instante ou época da observação;
- $\mathbf{X}^i$  : vetor posição do satélite  $i$  com componentes  $X^i, Y^i, Z^i$  no sistema geocêntrico CTS;
- $\mathbf{X}_B$  : vetor posição da antena do receptor em  $B$ , de componentes  $X_B, Y_B, Z_B$  no sistema geocêntrico CTS;
- $c$  : velocidade de propagação da luz no vácuo;
- $\delta t_B$  : erro de sincronização entre o sistema de tempo GPS e o relógio do receptor instalado em  $B$ ;
- $\tau_B^i$  : tempo de propagação do sinal entre a antena do satélite  $i$  e a antena do receptor instalado em  $B$ .

Três destas observações são necessárias para se obter coordenadas tridimensionais, mas uma quarta observação é adicionada para resolver o erro de não-sincronismo entre os relógios do receptor ( $B$ ) e do satélite ( $i$ ) (SEEBER, 1993, p. 209).

---

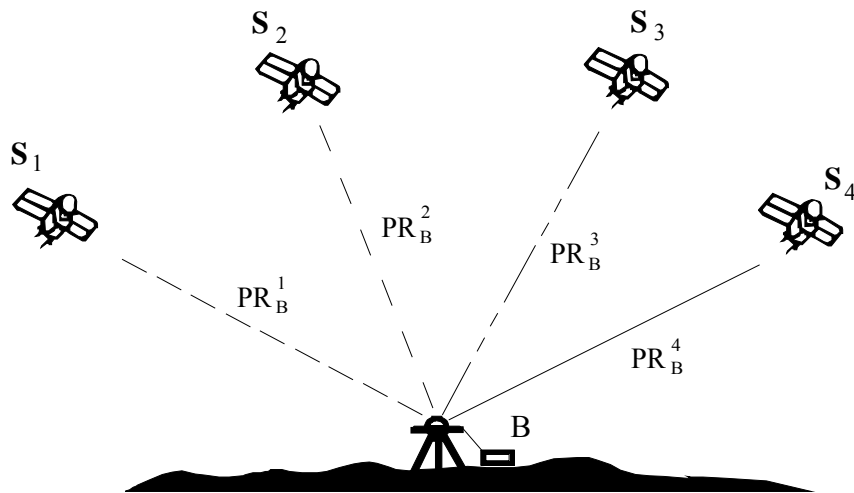
<sup>2</sup> Pseudodistância: termo que provém de *pseudorange* (ingl.) e significa a distância satélite-receptor afetada por efeitos ou erros sistemáticos (SEEBER, 1993, p. 215).

<sup>3</sup> O referencial do NAVSTAR-GPS é o WGS84 (*World Geodetic System 1984*) (GEMAEL e ANDRADE, 2004, p. 168 e 247).



As coordenadas da antena do receptor instalado no ponto  $B$  (estação  $B$ ) podem ser obtidas pela observação simultânea a 4 satélites ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$ ), conforme ilustra a figura 2.

FIGURA 2—PRINCÍPIO DO POSICIONAMENTO POR PONTO



FONTE: LEICK (1995, p. 260).  
NOTA: modificado pelo autor.

#### 2.1.4 Observáveis GPS e Erros Envolvidos

Na prática, duas observáveis fundamentais são utilizadas no GPS para a determinação das pseudodistâncias: os códigos e as fase das portadoras. As medições de código são mensuradas em unidade de tempo e as distâncias equivalentes de propagação são as pseudodistâncias. Existem outras componentes de erro que também estão presentes na medição de pseudodistância, que pode ser representada matematicamente para uma dada estação  $B$  conforme a equação (SEEBER, 2003, p. 257):

$$PR_B^i = c(t_r - T_t) = R_B^i + c\delta t_B + c\delta t_{ion} + c\delta t_{trop} + c\delta t^i + \varepsilon_B, \quad (2.2)$$

onde:

$t_r$  : tempo em que o sinal foi recebido no receptor instalado em  $B$ ;

- $T_i$  : tempo em que o sinal foi transmitido do satélite  $i$ ;  
 $R_B^i$  : distância geométrica ou raio vetor entre a antena do satélite  $i$  e a antena do receptor instalado em  $B$ ;  
 $\delta t_{ion}$  : erro devido ao atraso ionosférico;  
 $\delta t_{trop}$  : erro devido ao atraso troposférico;  
 $\delta t^i$  : erro do relógio do satélite  $i$  em relação ao tempo GPS;  
 $\delta t_B$  : erro de sincronização do relógio do receptor instalado em  $B$ ;  
 $\varepsilon_B$  : demais erros (ruído, efeito de multicaminho, centro de fase da antena).

A medida da fase da onda portadora consiste na comparação da fase do sinal recebida pelo receptor com a fase da réplica do sinal gerado neste receptor. Sua formulação segundo SEEGER (1993, p. 249) pode ser descrita por:

$$\Phi_B^i = \frac{2\pi}{\lambda} (|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_B| - N_B^i \lambda + c \delta t_B), \quad (2.3)$$

onde:

- $\Phi_B^i$  : diferença de fase medida da onda portadora do receptor instalado em  $B$  a um satélite  $i$ ;  
 $\lambda$  : comprimento da onda portadora;  
 $N_B^i$  : número inteiro de ciclos de onda (ambigüidades);

Pela multiplicação com o comprimento de onda, pode-se representar a fase relativa em pseudodistância para a fase da portadora em uma época  $t$  (KRUEGER, 1996, p. 20):

$$PR_B^i(t) = |\mathbf{R}_B^i(t)| + c \delta t_B(t) + c \delta t_{ion}(t) + c \delta t_{trop}(t) + \lambda N_B^i(t) + \varepsilon_B(t) \quad (2.4)$$

Grande parte dos erros (indicados nas equações 2.2 e 2.3), que são causados tanto pelos satélites como pela propagação do sinal na atmosfera, são correlacionados espacialmente em função do comprimento da linha de base entre receptores que rastreiam simultaneamente um mesmo grupo de satélites. Combinações lineares formadas entre as observáveis originais geram novas observáveis que possibilitam a

eliminação ou minimização dos erros correlacionados. Em alguns casos, as ambigüidades podem ser resolvidas mais facilmente com as combinações lineares do que com as observações originais (SEEBER, 1993, p. 254). Para a combinação entre as fases das portadoras, a equação segundo WÜBBENA<sup>7</sup> apud SEEBER (1993, p. 257) é:

$$\Phi_{n,m}(t) = n\Phi_1(t) + m\Phi_2(t) \quad (2.5)$$

onde:

$n, m$  : coeficientes inteiros e arbitrários;

$\Phi_{n,m}$  : combinação linear da fase da portadora, expressa por ciclos;

$\Phi_1$  : fase medida da onda portadora  $L_1$ ;

$\Phi_2$  : fase medida da onda portadora  $L_2$ .

As principais combinações lineares e suas propriedades podem ser encontradas em SEEBER (1993) e KRUEGER (1996).

A diferença entre as grandezas observáveis das estações gera novas grandezas observáveis que são denominadas simples, dupla e tripla diferença de fase, as quais são de fundamental importância no contexto do posicionamento por GPS. Para observações de fase, a simples diferença de fase (SDF) consiste na diferença entre as fases da portadora geradas por duas estações  $A$  e  $B$ , para um satélite  $i$  em um instante  $t$ . Assumindo simultaneidade das observações, o estado do relógio do satélite é eliminado; a equação é:

$$\Delta PR_{A,B}^i(t) = \Delta \left| \mathbf{R}^i(t) \right|_{A,B} + c\Delta\delta_{A,B}(t) + c\Delta\delta_{(ion,trop)A,B}^i(t) + \lambda\Delta N_{A,B}^i(t) + \Delta\epsilon_{A,B}^i(t) \quad (2.6)$$

onde  $\Delta$  é um operador que representa a diferença entre os receptores instalados em  $A$  e em  $B$ . A diferença entre as fases das portadoras geradas por duas estações  $A$  e  $B$ , para dois satélites  $i$  e  $k$  obtidas num mesmo instante  $t$ , conduz também à eliminação da incógnita do relógio do receptor e é denominada de dupla diferença de fase (DDF):

---

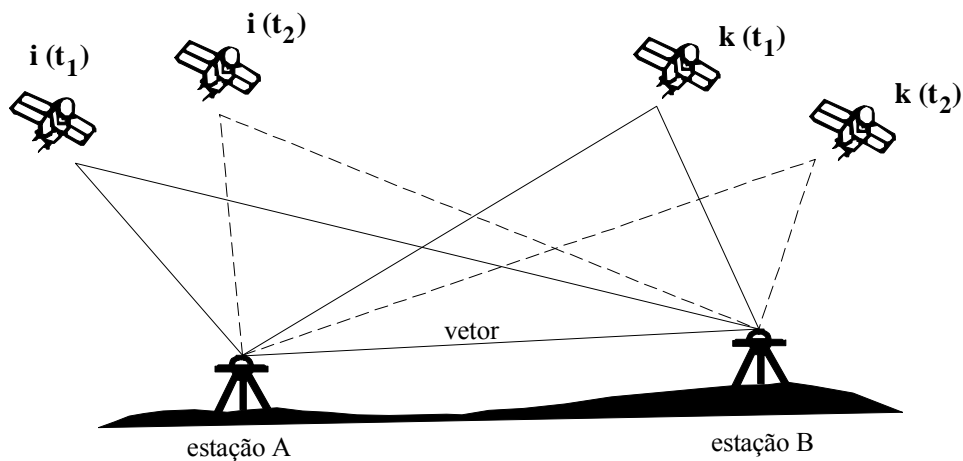
<sup>7</sup> WÜBBENA, G. (1989). **The GPS adjustment software package GEONAP, concepts and models.** Proc. 5<sup>th</sup> Int. Geod. Symp. Satellite Positioning, vol. 1, 452-461, Las Cruces.

$$\nabla \Delta PR_{A,B}^{i,k}(t) = \nabla \Delta |\mathbf{R}(t)|_{A,B}^{i,k} + c \nabla \Delta \delta_{(ion,trop)A,B}^{i,k}(t) + \lambda \nabla \Delta N_{A,B}^{i,k}(t) + \nabla \Delta \varepsilon_{A,B}^{i,k}(t), \quad (2.7)$$

onde  $\nabla$  é um operador que representa a diferença entre os satélites  $i$  e  $k$ . A tripla diferença de fase (TDF) consiste em observações simultâneas de duas estações  $A$  e  $B$  para dois satélites  $i$  e  $k$ , em duas épocas distintas  $t_1$  e  $t_2$  (figura 3) proporcionando o cancelamento do termo  $N_{A,B}^{i,k}$ :

$$\delta \nabla \Delta PR_{A,B}^{i,k}(t_1, t_2) = \delta \nabla \Delta |\mathbf{R}(t_1, t_2)|_{A,B}^{i,k} + c \delta \nabla \Delta \delta_{(ion,trop)A,B}^{i,k}(t_1, t_2) + \delta \nabla \Delta \varepsilon_{A,B}^{i,k}(t_1, t_2). \quad (2.8)$$

FIGURA 3—TRIPLA DIFERENÇA DE FASE



FONTE: LEICK (1995, p. 262).

NOTA: modificado e traduzido pelo autor.

Esta formulação é encontrada com mais detalhes nas seguintes literaturas: SEEGER (2003, p. 259), LEICK (1995, p. 259), LACHAPELLE (1990, p. 17) e BOSSLER et al. (1980, p. 560).

A precisão do posicionamento com o GPS depende da minimização ou eliminação de erros sistemáticos e de ruídos que afetam as medidas de pseudodistâncias baseadas no código e na fase da portadora. No posicionamento relativo, a contribuição isolada de um erro pode ser analisada em termos de seu efeito na determinação das linhas de base. O quadro 2 apresenta uma exposição sumária dos

erros e suas influências na determinação do posicionamento relativo com o emprego da fase da portadora.

QUADRO 2 – INFLUÊNCIA DOS ERROS NO POSICIONAMENTO RELATIVO (SEM S/A<sup>4</sup>)

ERRO	ERRO NA POSIÇÃO
Efemérides transmitidas	0,1 – 0,5 ppm
Relógio do satélite	praticamente eliminado
Ionosfera (dupla frequência)	mm – cm
Troposfera	mm – dm
Multicaminho	5 cm
Variação do centro de fase da antena:	praticamente eliminado mm – cm
Antena do mesmo tipo	
Diferentes tipos de antena	
Influência total	mm – dm

FONTE: SEEGER (2000, p. 12).

NOTA: modificado e traduzido pelo autor.

As fontes de erros podem ser classificadas em três grupos principais (HOFMANN-WELLENHOF et al. 2001, p. 91): erros relacionados com os satélites, erros relacionados com o meio de propagação do sinal e erros relacionados com o receptor (quadro 3):

QUADRO 3 – ERROS SISTEMÁTICOS PRESENTES NAS OBSERVAÇÕES GPS

FONTE	EFEITO
Satélite	Erro dos relógios Erro orbital
Propagação do sinal	Refração ionosférica Refração troposférica
Receptor	Variação do centro de fase da antena Erro do relógio Multicaminho

FONTE: HOFMANN-WELLENHOF et al. (2001, p. 91).

NOTA: traduzido pelo autor.

---

<sup>4</sup> Disponibilidade seletiva (S/A): técnica instituída nos satélites do Bloco II em 25 de março de 1990 para a redução intencional da qualidade do posicionamento dirigida aos usuários do Serviço de Posicionamento Padrão (SPS). A S/A compreende duas técnicas: a técnica épsilon ( $\epsilon$ ) que é a manipulação dos dados relativos às efemérides transmitidas; e a técnica dither ( $\delta$ ) que consiste na desestabilização intencional da frequência dos relógios dos satélites (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001, p. 17). A técnica dither encontra-se desativada desde primeiro de maio de 2000.

#### 2.1.4.1 Erros relacionados aos satélites

##### a) Erros dos relógios dos satélites

Os erros dos relógios dos satélites referem-se ao não-sincronismo dos relógios dos satélites com o sistema de tempo GPS, em que a diferença pode ser, no máximo, de 1 milissegundo (MONICO, 2000, p. 124).

##### b) Erro orbital

Os erros orbitais ocorrem porque as efemérides transmitidas não representam a posição exata do satélite. A componente radial do erro afeta diretamente a precisão da pseudodistância e conseqüentemente as posições determinadas no posicionamento de uma antena GPS, com maior grau de erros no posicionamento de uma estação isolada do que no posicionamento relativo. O efeito de erros orbitais em técnicas diferenciais depende da distância entre as antenas de referência e móvel, i.e., da linha de base. O efeito na determinação da posição pode chegar a 0,5 ppm empregando órbitas transmitidas com a S/A desativada e até 0,05 ppm com órbitas precisas (SEEBER, 2000, p. 12).

#### 2.1.4.2 Erros relacionados com o meio de propagação do sinal

A determinação de distâncias com a utilização de ondas eletromagnéticas implica no estudo das influências do meio em que elas se propagam e nas formas de reduzi-las. No meio de propagação do sinal GPS estão contidos a troposfera e a ionosfera, camadas da atmosfera com características diferentes.

##### a) Refração ionosférica

O atraso ionosférico é o erro em distância proveniente da propagação do sinal GPS pela ionosfera, região da atmosfera delimitada por uma faixa de 50 a 1000 quilômetros acima da superfície da Terra. Os efeitos ionosféricos sobre o sinal GPS nos primeiros 100 quilômetros desta faixa é negligenciável, sendo a parte superior a

responsável pelas variações que causam problemas potenciais para a recepção dos sinais emitidos pelos satélites GPS (KLOBUCHAR, 1996, p. 487).

Na ionosfera, a velocidade de propagação da fase não é a mesma que a velocidade de propagação dos códigos. Assim, dois importantes parâmetros devem ser considerados no cálculo do efeito ionosférico: o índice de refração de fase da portadora e o índice de refração de grupo (código) (OIU et al, 1995, p. 97). As medidas de código são retardadas, acarretando pseudodistâncias maiores que as distâncias geométricas, enquanto as medidas de fase da portadora são adiantadas, acarretando pseudodistâncias menores (CAMARGO, 1999, p. 17).

A influência da ionosfera na propagação de sinais de rádio tem como principal característica a dispersão. FONSECA JUNIOR (2002, p. 15) elucida que a refração do sinal neste meio é função da frequência do sinal, o que torna possível neutralizar parte destes efeitos quando se utilizam receptores de dupla frequência. O erro do atraso ionosférico na portadora  $L_1$  é dado por (KLOBUCHAR, 1996, p. 490):

$$\delta_{ion} = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (PR_1 - PR_2), \quad (2.9)$$

onde:

$f_1, f_2$  : frequências  $L_1$  e  $L_2$  (Hz); e  
 $PR_1, PR_2$  : pseudodistâncias nas frequências  $L_1$  e  $L_2$ ;

Os efeitos residuais da ionosfera em condições normais de atividade solar são inferiores a 5 ppm (SEEBER, 2000, p. 13), e podem variar conforme a hora do dia, a estação do ano, a localização do receptor na superfície terrestre, a linha de visada, a atividade solar e o estado do campo magnético da Terra (KLOBUCHAR, 1991, p. 48).

#### b) Refração troposférica

A troposfera é a camada mais baixa da atmosfera, de aproximadamente 40 km da superfície terrestre (SEEBER, 2003, p.48). Ela é eletricamente neutra, sendo composta por gases secos e vapor d'água que interferem na propagação dos sinais

eletromagnéticos no domínio das frequências de rádio (SPILKER, 1996, p. 517). A refração troposférica afeta a modulação do código e da fase da portadora com a mesma intensidade, causando diminuição da velocidade de propagação dos sinais GPS. Com isso, as pseudodistâncias obtidas são maiores que as distâncias geométricas. Este efeito é denominado atraso troposférico, porquanto a maior parte do efeito ocorre na troposfera<sup>5</sup> (JENSEN, 2002, p. 28).

O erro de atraso troposférico é função da elevação do satélite e das condições atmosféricas como temperatura, pressão e umidade relativa. Normalmente, ele é expresso por duas componentes (IFADIS, 1992, p. 289): uma composta de gases secos, chamada componente hidrostática e uma outra composta de vapor d'água, denominada componente úmida.

A componente úmida ocorre em altitudes de até aproximadamente 10 km (SAASTAMOINEN, 1972, p. 249). Sua descrição provém da densidade do vapor d'água na atmosfera e representa 10% da refração troposférica total (SEEBER, 2003, p. 315). Sua modelagem é mais complexa, dada a distribuição irregular do vapor d'água na atmosfera (SCHÜLER, 2001, p. 39). A componente hidrostática ocorre em altitudes de até aproximadamente 40 km, região denominada estratosfera, cuja constituição é relativamente mais uniforme (SPILKER, 1996, p. 518), e, portanto, pode ser descrita por modelos troposféricos disponíveis (LEICK, 1995, p. 307), e.g., Hopfield e Saastamoinen.

O efeito troposférico aumenta conforme diminui o ângulo de elevação do sinal GPS incidente na antena do receptor, afetando os sinais em termos de atenuação, cintilação e atraso do sinal (SPILKER, 1996, p. 518). Conforme LEICK (1995, p. 307), as pseudodistâncias sofrem acréscimos que variam aproximadamente com a cossecante do ângulo de elevação do satélite, podendo alcançar um erro de até 28 m com um ângulo de elevação de 5°. Nas aplicações GPS de alta precisão, estes erros podem ser reduzidos com observações em ângulos de elevação acima de 15° ou

---

<sup>5</sup> Troposfera: SCHÖDLBAUER (2000, p. 131) afirma que a estratosfera, a mesosfera e a troposfera são incluídas na terminologia troposfera pelo fato de que a refração da luz e das ondas de rádio nas duas primeiras camadas seguem as mesmas leis físicas que na troposfera.



minimizados via diferenciação quando se emprega o método de posicionamento relativo em linhas de base curtas (SEEBER, 2003, p. 315), e.g., até 10 km.

#### 2.1.4.3 Erros relacionados com o receptor

##### a) Erro devido ao centro de fase da antena do receptor

A variação do centro de fase (ingl. *Phase Center Variation – PCV*) é um erro proveniente da não coincidência do centro de fase geométrico das antenas GPS com o centro de fase eletrônico das mesmas. Esta diferença varia em função da intensidade, direção e frequência dos sinais incidentes. A distância entre o centro eletrônico e o centro geométrico pode variar da ordem de milímetros a centímetros nas antenas empregadas em levantamentos geodésicos, por esta razão não pode ser desconsiderada em aplicações de alta precisão (WANNINGER, 2000, p. 24). Em tal caso, as antenas envolvidas devem ser calibradas visando corrigir as observações desse efeito.

Inserido nesta temática está o comportamento não-ideal das antenas dos receptores GPS, uma vez que possuem características construtivas e funcionais variadas. Na seção 2.2.4 este assunto é tratado com mais detalhes.

##### b) Erro devido ao multicaminho

Multicaminho é um fenômeno periódico pelo qual um sinal chega no receptor via múltiplos caminhos, atribuídos à reflexão em objetos próximos à antena e à difração (BRAASCH, 1996, p.547). O efeito de multicaminho ocorre pela sobreposição dos sinais refletidos nos sinais recebidos diretamente dos satélites, atuando com diferentes intensidades nas medições de código e fase da portadora (THIEL, 1995, p. 107). O multicaminho é uma função de diversos fatores tais como a geometria da constelação, a posição das superfícies refletoras e da antena receptora, a potência do sinal, o tipo do refletor (material, dimensão e superfície), o programa de processamento empregado na avaliação das observações e os equipamentos utilizados no rastreamento (tipo de antena e receptor) (BECKER, 1994, p. 123).

A maioria das interferências que atuam nas medições de fase da onda portadora (e.g., atraso atmosférico, erros orbitais e erros do relógio) é correlacionada espacialmente entre si e normalmente podem ser eliminadas pela diferenciação em linhas de base curtas (RAY e CANNON, 1999, p. 1). As reflexões de sinais provindos de baixos ângulos de incidência não são atenuadas, explicando o porquê de satélites situados em elevações baixas serem mais suscetíveis a gerar maiores influências ante o efeito de multicaminho (LEICK, 1995, p. 312). O multicaminho é uma interferência limitada e local que não é suprimida via diferenciação de observações entre estações. Por isso, é assinalada como a principal fonte de erros nas aplicações GPS de precisão. Conforme RAY (2000, p. 3), os métodos para reduzir a influência do efeito de multicaminho podem ser classificados em:

- a) redução baseada na antena;
- b) aprimoramento de tecnologias baseadas no receptor; e
- c) processamento de sinais e dados.

Da forma mais simples, o efeito de multicaminho também pode ser reduzido posicionando-se a antena do receptor GPS próxima a superfícies com baixo poder de reflexão (CROSS, 1999, p. 3) ou empregando-se materiais absorventes de microondas ao redor da antena para melhorar as características de ganho dela (seção 2.2.2) (BLETZACKER, 1985, p. 413). Dependendo do tipo de antena, o emprego de um plano de terra<sup>6</sup> (figura 4) acoplado no invólucro do elemento receptor pode ser significativo para expelir sinais refletidos no solo (seção 2.2.3). Trata-se de uma estrutura metálica, geralmente um disco plano, que atua como blindagem ou terra, servindo como proteção contra sinais vindos de direções indesejadas. No caso do GPS, sinais vindos abaixo do plano horizontal da antena são bloqueados pelo plano de terra.

---

<sup>6</sup> Plano de terra: ingl. *ground plane*.

FIGURA 4—ANTENA GEODÉSICA COM PLANO DE TERRA



Uma proteção mais aprimorada que permite a eliminação de sinais refletidos é o dispositivo *choke ring*. Trata-se de um artefato metálico constituído de um plano de terra cuja superfície possui um conjunto de quatro anéis metálicos eqüidistantes entre si e concêntricos ao eixo vertical da antena, i.e., ao elemento de recepção da antena. Estas estruturas são perfiladas na mesma espessura que o plano de terra e suas larguras correspondem a um quarto do comprimento de onda ( $\lambda$ ) das frequências  $L_1$  e  $L_2$  (TRANQUILLA et al., 1989, p. 357), valor máximo do multicaminho para a portadora (MONICO, 2000, p. 147). Essa composição faz dessa antena a que melhor oferece proteção contra o multicaminho dos sinais GPS (figura 5).

FIGURA 5—ANTENA CHOKER RING



Diversas técnicas foram e estão sendo desenvolvidas para identificar o efeito de multicaminho na fase da onda portadora. GEORGIADOU e KLEUSBERG (1988) apresentaram um modelo matemático para descrever este efeito como uma função da intensidade do sinal refletido e da geometria satélite-refletor-antena, mostrando a possibilidade de detectá-lo nas observações de dupla frequência em linhas de base curtas. SLEEWAEGEN (1997) empregou a informação da relação sinal-ruído (SNR)

fornecida por um receptor GPS a fim de estimar o efeito de multicaminho. RAY (2000) apresenta os fundamentos da teoria do multicaminho e propõe um método capaz de reduzir em média 15% dos erros de multicaminho no código e 22% na portadora. Atualmente, pode-se realizar a detecção, localização e quantificação da intensidade do multicaminho na fase da portadora com o auxílio de programas computacionais, e.g., WANNINGER e MAY (2000) (seção 3.2.3.3). As influências do efeito de multicaminho nas observações GPS são também investigadas no âmbito da calibração de antenas GPS, e.g., WÜBBENA et al. (2006c). Mais informações sobre o efeito de multicaminho estático nas medidas da fase das portadoras GPS podem ser encontradas em FARRET (2000).

c) Erro do relógio dos receptores

O erro do relógio dos receptores provém da deriva (variação da marcha) dos osciladores internos desses relógios, que diferem do tempo GPS. Estes erros são eliminados no posicionamento relativo com o emprego da fase da portadora.

d) Considerações sobre a Razão Sinal-Ruído (SNR)

Os receptores e antenas GPS geram, a partir de um campo elétrico existente que induza tensão elétrica na antena, uma informação denominada razão sinal-ruído (ingl. *signal-to-noise ratio* - *SNR* ou *S/N*), estimada a partir do quociente da potência do sinal pela potência do ruído (LAU e MOK, 1999, p. 187):

$$SNR = \frac{P_S}{P_R}, \quad (2.10)$$

onde  $P_S$  é a potência do sinal e  $P_R$  é a potência do ruído, ambas em watts. Esta informação é gerada pelos receptores GPS, podendo ser mensurada através de técnicas especiais (RAY, 2000, p. 106). Em virtude do efeito de multicaminho e ruídos provocados por sinais de outra natureza, este campo elétrico sofre alterações que se manifestam de forma distinta nos receptores de duas frequências (BUTSCH, 1997, p. 178).

A qualidade dos sinais GPS recebidos pode ser quantificada por meio do comportamento dos valores de sinal-ruído, que são dados na unidade AMU<sup>7</sup> e indicam a relação entre a intensidade do sinal e a intensidade do ruído. Eles podem ser empregados como grandezas de observação para análises da qualidade dos dados originais.

O nível do ruído em um receptor GPS geodésico é constante, de forma que os valores da SNR correspondem diretamente à intensidade do sinal recebido no receptor. De acordo com o princípio da reciprocidade (seção 2.2.2), o diagrama de campo de uma antena é o mesmo para a recepção e para a transmissão. Na transmissão, o objetivo principal é obter a maior intensidade de campo possível no ponto ou pontos de recepção, finalidade esta que exige eficiência e ganho altos. Na recepção, ao contrário, a principal exigência é a razão sinal-ruído ser alta (KRAUS, 1983, p. 409).

A SNR é uma função de fatores internos assim como fatores externos ao receptor. A estes pertencem o enfraquecimento do sinal no decurso entre as antenas do satélite e do receptor e a minoração atmosférica<sup>8</sup>. Àqueles pertencem o ganho de recepção da antena e o efeito de multicaminho (BILICH et al., 2001, p.3).

Recentemente, os valores da SNR têm sido introduzidos como um indicador de qualidade para as observações GPS e usados no desenvolvimento de modelos para a redução do efeito de multicaminho (SATIRAPOD, 2006, p. 383) visto que a intensidade do sinal expressa pelos valores da SNR é uma função dos parâmetros de multicaminho da fase da onda portadora (SPILKER<sup>9</sup> apud RAY, 1999, p. 5). Supõe-se que cada satélite possui uma precisão diferente, a qual depende do valor da SNR. O satélite que possui alta SNR gerará menos ruído que o satélite com baixo valor da SNR. LANGLEY (1997, p. 43) afirma que a SNR é o parâmetro chave na análise do rendimento do GPS, afetando diretamente a precisão das observações de pseudodistância e fase da portadora no receptor. LAU e MOK (1999) descrevem um

---

<sup>7</sup> AMU (ingl. *Arbitrary Manufacturing Unit*): unidade arbitrária de sinal-ruído definida pelo fabricante. Os valores são gerados a partir das características individuais do equipamento.

<sup>8</sup> Minoração atmosférica: a qualidade dos sinais incidentes na antena GPS depende do ângulo de elevação dos satélites, porquanto os sinais provindos de baixas elevações têm sua potência atenuada por efeitos troposféricos (SPILKER, 1996, p. 521).

algoritmo empregando a SNR para reduzir o efeito de multicaminho das observações assim como interferências na medição da fase da portadora em levantamentos diferenciais. BRUNNER et al. (1999) propõem uma técnica empregando a SNR para minimizar o efeito da difração dos sinais GPS em mais de 50% se comparada com as técnicas de processamento GPS convencionais.

A maioria dos modelos da SNR foi gerada com vistas à redução do efeito de multicaminho. Atualmente, estes estudos são de grande interesse no posicionamento com o GPS, especialmente em regiões urbanas.

## 2.2 DESCRIÇÃO DAS ANTENAS DE RECEPTORES GPS

Nesta seção é apresentado um panorama dos princípios fundamentais de propagação das ondas eletromagnéticas, das funções das antenas e suas principais características. O objetivo é realizar uma breve revisão dos conceitos fundamentais envolvidos, dada a complexidade dos assuntos que trata a Engenharia Eletrônica. Para mais informações recomendam-se: KRAUS (1988), LORRAIN et al. (1988), JOHNSON (1993), ROTHAMMEL (1995), BALANIS (1998), CARR (1998), MACHADO (2002) e RIBEIRO (2004).

### 2.2.1 Fundamentos da Propagação de Ondas Eletromagnéticas

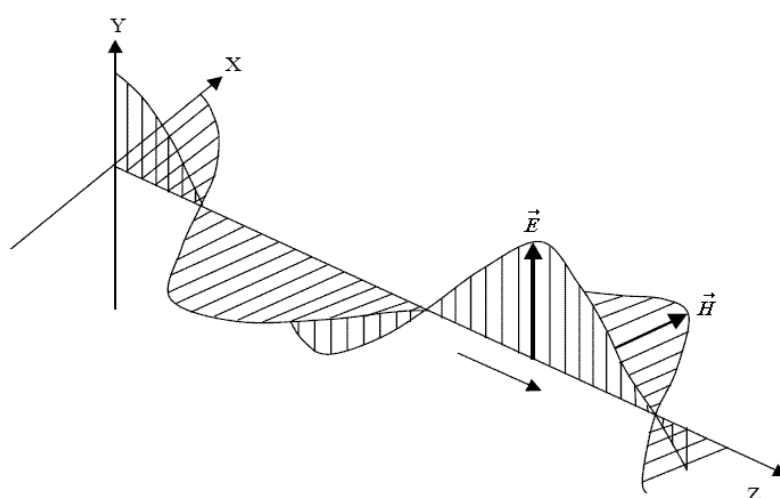
Ondas eletromagnéticas são perturbações periódicas constituídas pela presença de um campo elétrico ( $\vec{E}$ ) e de um campo magnético ( $\vec{H}$ ) variáveis no tempo que se induzem mutuamente e afastam-se da origem com a velocidade da luz. Quando empregada em um sistema de radiocomunicações, a onda eletromagnética desloca-se de um ponto, situado no lado do sistema conhecido como transmissor, até a outra extremidade, denominada receptor. A esta transferência da energia eletromagnética entre os dois pontos dá-se o nome de propagação de onda (RIBEIRO, 2004, p. 29).

---

<sup>9</sup> SPILKER, J. J. (1996). GPS signal structure and theoretical performance. Global Positioning System: Theory and Applications, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 1, Cap. 3, p. 57-120.

No espaço livre (vácuo) ou em qualquer outro meio isotrópico<sup>10</sup>, homogêneo e linear, os campos elétrico ( $\vec{E}$ ) e magnético ( $\vec{H}$ ) são transversos à direção de propagação e perpendiculares entre si. Considerando um sistema de coordenadas cujo eixo Z está na direção de propagação da onda, pode-se representar os vetores campos elétrico e magnético no plano XY conforme ilustra a figura 6. Tal onda é denominada onda eletromagnética transversal (TEM).

FIGURA 6—REPRESENTAÇÃO DOS CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO



Fonte: RAY (2000, p. 28).

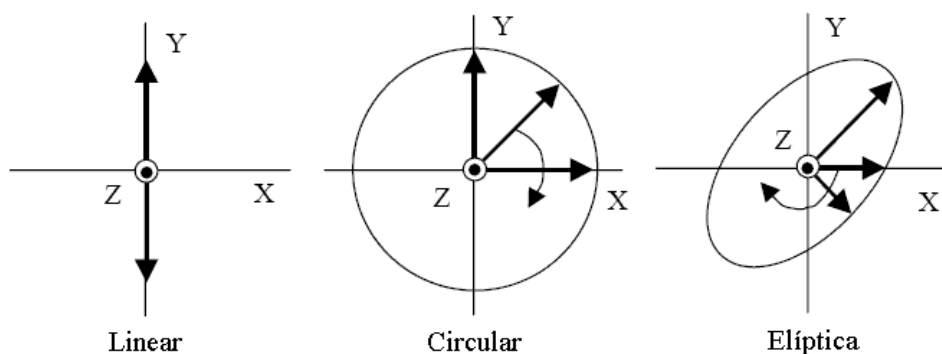
Em geral, uma onda eletromagnética é caracterizada por sua frequência, amplitude, fase e polarização. Este último parâmetro define a direção de vibração da onda, que é uma função da variação do campo elétrico no tempo. O vetor campo elétrico pode ser decomposto em dois vetores ortogonais: um paralelo ao eixo x e outro paralelo ao eixo y. Se as componentes x e y possuem a mesma fase (ou são diferentes por um múltiplo inteiro de  $\pi$ ), trata-se do caso de polarização linear, em que a direção do campo elétrico permanece invariável em relação à direção de propagação da onda. Se, no entanto, o vetor campo elétrico rotaciona em função do tempo, logo o vetor descreve a polarização elíptica ou circular. Se as duas componentes diferem em

---

<sup>10</sup> Isotrópico: qualidade de alguns meios ou materiais que consiste em apresentarem as mesmas propriedades físicas em todas as direções.

fase, sua soma descreve uma elipse no eixo z, caracterizando a polarização elíptica. Se as duas componentes têm a mesma amplitude mas estão defasadas em  $\pi/2$  (ou um múltiplo ímpar de  $\pi/2$ ), a elipse se torna um círculo, e a polarização é dita circular. A polarização circular pode ser destrógira (circular à direita) ou levógira (circular à esquerda) dependendo da direção de rotação do vetor campo elétrico (LANGLEY, 1998a, p. 50). A figura 7 mostra os diferentes casos de polarização, representadas conforme a projeção do vetor campo elétrico no plano perpendicular à propagação da onda.

FIGURA 7–POLARIZAÇÃO LINEAR, CIRCULAR E ELÍPTICA



Assim, qualquer onda propagando-se em uma dada direção pode ser considerada como sendo a combinação de duas outras ondas, as quais estão polarizadas nas outras duas dimensões perpendiculares à direção de propagação (MACHADO, 2006, p. 292). Na Geodésia por Satélites são empregados, em geral, sinais polarizados circularmente em virtude do movimento orbital dos satélites e do efeito Faraday<sup>11</sup> sobre o plano de polarização (SEEBER, 2003, p. 44; DIERENDONCK, 1996, p. 341).

A oscilação espacial de uma onda eletromagnética é descrita pelo seu comprimento de onda  $\lambda$ , que é a distância entre dois pontos consecutivos de uma onda

<sup>11</sup> Rotação de Faraday (ou efeito Faraday): os elétrons livres na atmosfera contribuem para o enfraquecimento e cintilação das ondas eletromagnéticas. Os sinais de polarização linear sofrem mudanças em sua polarização quando atravessam a ionosfera. Este fenômeno é conhecido como rotação de Faraday, e pode ser controlado com o emprego de polarização apropriada (SUN, 2005, p. 71).



que têm a mesma configuração espacial. A frequência  $f$  é a repetição da onda na unidade de tempo. A relação entre frequência e o período  $T$  é expressa por:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2.10)$$

O comprimento de onda e a frequência estão relacionadas pela velocidade de propagação da onda  $v$ , resultante do produto

$$v = \lambda \cdot f, \quad (2.11)$$

onde  $v$  é dada em metros por segundo,  $\lambda$  em metros e  $f$  em oscilações por segundo ou hertz. A fase ( $\Phi$ ) de uma onda periódica é a parte fracional através do qual o tempo ( $t$ ) é avançado em relação a uma origem de tempo arbitrária  $t_0$ . Quando ondas são expressas matematicamente, a frequência angular  $\omega$ , dada em radianos por segundo, é relacionada com a frequência  $f$  por meio da equação

$$\omega = 2\pi f, \quad (2.12)$$

e a constante de fase ou número de onda  $k$  é dado por

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2.13)$$

que é relacionado com a velocidade de propagação  $v$  por

$$v = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}. \quad (2.14)$$

Ondas periódicas que podem ser modeladas por uma função senoidal no tempo e no espaço são denominadas ondas senoidais, podendo ser escritas na forma (SEEBER, 2003. p.43):

$$y = A \cdot \text{sen}\left(2\pi \frac{t}{T} + \Phi_0\right), \quad (2.15)$$

onde:

$y$  é a magnitude da perturbação na época  $t$  (intensidade da onda);

$\Phi_0$  é a fase da onda no instante  $t=0$ ; e

$A$  é a amplitude máxima da onda.

A fase no instante  $t$  é dada por

$$\Phi = \frac{t}{T} + \Phi_0. \quad (2.16)$$

O ângulo de fase  $\varphi$  em um ponto de uma onda periódica é a distância entre este ponto e um ponto de referência específico. Para sua representação em um sistema coordenado, empregam-se normalmente medições angulares dadas em um ciclo de onda completo ( $2\pi$  radianos), de forma que

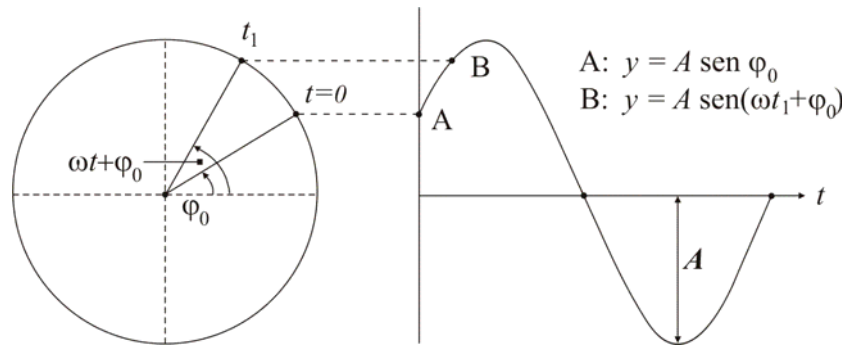
$$\varphi = 2\pi\Phi. \quad (2.17)$$

A partir das equações 2.12 e 2.17, escreve-se a equação 2.15 na forma

$$y = A \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi_0), \quad (2.18)$$

cujas interpretação geométrica é visualizada na figura 8.

FIGURA 8–INTERPRETAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDA



Fonte: KAHMEN (1978, p. 22).

Nota: modificado pelo autor.

O comprimento de onda das ondas eletromagnéticas e suas velocidades de propagação são funções das propriedades do meio no qual elas se propagam. No vácuo, a velocidade  $v$  assume o valor da velocidade da luz  $c$ . A partir da equação 2.11 obtém-se:

$$c = \lambda_{\text{vácuo}} \cdot f. \quad (2.19)$$

Em outros meios, a velocidade de propagação é caracterizada pelo índice de refração  $n$

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{\text{vácuo}}}{\lambda} = \frac{k}{k_{\text{vácuo}}}, \quad (2.20)$$

que é a relação entre a velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo e a sua velocidade de propagação no meio considerado.

Os fundamentos teóricos dos campos e ondas eletromagnéticas foram formulados por James Clerk Maxwell, que, em 1873, demonstrou a simetria completa entre eletricidade e magnetismo. Ele estabeleceu um conjunto de quatro equações que descrevem a existência dos fenômenos eletromagnéticos e mostram a ação recíproca entre os campos elétrico e magnético. Uma das consequências da teoria de Maxwell foi a possibilidade de emitir e receber energia em forma de ondas eletromagnéticas empregando antenas.

### 2.2.2 Função e Características Gerais das Antenas

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* define antena como sendo a parte de um sistema de transmissão ou recepção responsável por irradiar ou receber ondas eletromagnéticas (IEEE, 1983, p. 7). Conforme KRAUS e MARHEFKA (2002, p. 12) antenas são dispositivos que permitem a transição entre a propagação de ondas eletromagnéticas em condutores e a propagação de ondas eletromagnéticas no espaço livre e vice-versa. A idéia básica de toda antena receptora é incorporar uma parte da energia de uma onda incidente a uma linha de transmissão com base na Lei da Indução Eletromagnética<sup>12</sup> (WIESBECK, 2002, p. 1).

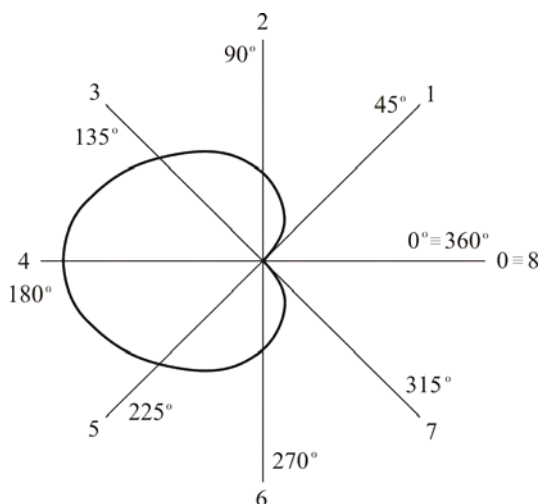
As principais características de uma antena se relacionam ao seu desempenho na formação de um enlace eletromagnético (RIBEIRO, 2004, p. 138). Incluem-se, entre outras características, o diagrama de irradiação, o ganho, a diretividade, o ângulo de largura de feixe e a eficiência de irradiação, sendo a diretividade e o ganho um dos parâmetros mais importantes de uma antena (KRAUS e MARHEFKA, 2002, p. 23). Quanto maiores a diretividade e o ganho, maior é a densidade de potência irradiada pela antena em uma determinada região. Simetricamente, será também capaz de captar maior potência para uma mesma densidade de potência incidente.

Uma forma de representar a direcionalidade de uma fonte de irradiação é através de figuras denominadas diagramas de irradiação (figura 9). Os valores proporcionais às intensidades medidas são marcados sobre linhas radiais, correspondentes às direções consideradas. Observa-se que no sentido indicado por 4 (180°) existe um máximo, enquanto que em 0 e 8 (0° ou 360°) os valores são nulos. A parte do diagrama compreendida entre dois nulos de irradiação é denominada lóbulo. Se o diagrama de uma antena apresentar lóbulos desiguais, o maior é dito lóbulo principal e os demais são ditos lóbulos secundários (KRAUS e MARHEFKA, 2002, p. 14).

---

<sup>12</sup> Indução Eletromagnética: é o fenômeno que origina a produção de corrente elétrica em um circuito colocado sob efeito de um campo magnético variável ou por um circuito em movimento em um campo magnético constante. A lei da indução eletromagnética quantifica a indução eletromagnética.

FIGURA 9—DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO



Fonte: SILVA (1977, p. 104).

Nota: modificado pelo autor.

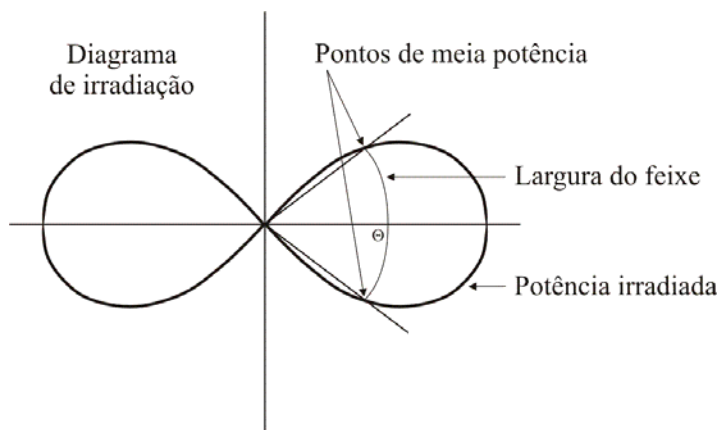
Define-se, também, o diagrama de fase da antena como a representação espacial da variação de fase do campo irradiado (RIOS e TERRA, 1982, p. 7).

O interesse na orientação de uma antena no espaço é que o ponto de recepção se situe na direção do máximo do lóbulo principal. Uma medida da capacidade da antena em concentrar a energia irradiada em torno da direção do máximo vem a ser a largura do feixe. Este parâmetro é definido como o ângulo entre os pontos do lóbulo principal que correspondem a metade da potência irradiada na direção do máximo. A figura 10 ilustra, como exemplo, a largura de feixe do dipolo de meia onda<sup>13</sup>.

A diretividade de uma antena é definida como a relação entre a energia irradiada na direção do máximo do diagrama de irradiação dessa antena, considerada sem perdas, e a que seria irradiada por uma antena isotrópica ideal (sem perdas) em uma direção qualquer, supondo que as duas irradie a mesma potência total (considerando em todas as direções). Na figura 11, as áreas limitadas pelos diagramas de irradiação do dipolo sem perdas e da antena isotrópica ideal são iguais, indicando que ambas irradiam a mesma potência total.

<sup>13</sup> Dipolo de meia onda: na transmissão de altas frequências ou microondas é importante concentrar a maior parte possível da energia irradiada na antena receptora. A forma básica de antena que serve para irradiar ondas eletromagnéticas nestas frequências é a dipolo de meio comprimento de onda, a partir da qual podem ser construídas outras antenas de construção mais complexas (LAURILA, 1976, p. 59).

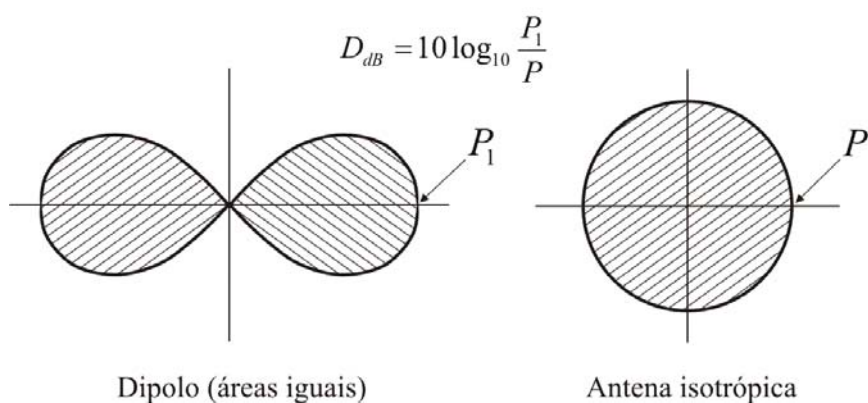
FIGURA 10–LARGURA DO FEIXE DO DIPOLO DE MEIA ONDA



Fonte: WIESBECK (2002, p. 57).

Nota: modificado pelo autor.

FIGURA 11–CONCEITO DE DIRETIVIDADE



Fonte: SILVA (1977, p. 107).

Nota: modificado pelo autor.

Nessas condições, a diretividade  $D$  é expressa pela equação

$$D_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P}, \quad (2.21)$$

onde  $P_1$  é a potência irradiada na direção do máximo do diagrama do dipolo e  $P$  é a potência irradiada em qualquer direção pela antena isotrópica.

As antenas reais não podem irradiar toda potência a elas entregue pelo transmissor, sendo uma parte dissipada na própria antena. A relação entre a potência

irradiada e a potência entregue pelo transmissor à antena é chamada de eficiência ( $\eta$ ), parâmetro que varia entre 0 e 1. O ganho da antena vem a ser o produto da sua diretividade pela eficiência:

$$G = \eta \cdot D. \quad (2.22)$$

A palavra ganho não deve ser interpretada como uma amplificação da potência da antena e sim como a capacidade dessa antena em concentrar na direção de interesse a potência que seria irradiada em outras direções, caso se utilizasse uma antena isotrópica. Em princípio, uma antena pode atuar tanto como elemento transmissor como receptor, i.e., a transição de energia pode ocorrer em ambas as direções. O teorema da Reciprocidade menciona que uma mesma antena com parâmetros e características permanentes pode ser empregada tanto para recepção como transmissão de sinais (KRAUS, 1983, p. 237). Exceção são as antenas ativas, por exemplo, as antenas de receptores GPS, que predominam como antenas receptoras e possuem pré-amplificadores integrados. Entretanto, as propriedades observadas na transmissão são válidas para a recepção, de forma que as noções de diretividade e ganho são também válidas para a recepção (SILVA, 1977, p. 108).

### 2.2.3 Características Gerais das Antenas GPS

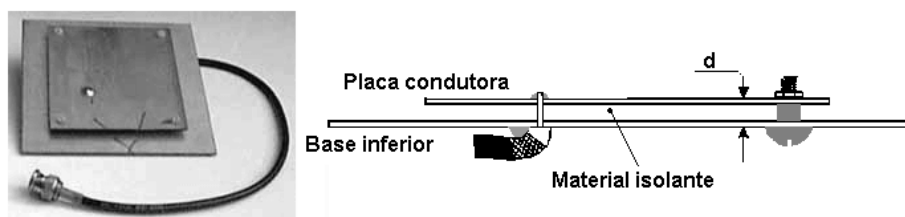
A antena GPS é o dispositivo destinado à captação das ondas eletromagnéticas nas faixas de radiofrequência da banda L (PINKER et al., 1998) sendo constituída basicamente de componentes metálicos dispostos em variadas configurações cujas dimensões são dadas em função do comprimento de onda. Os tipos de antenas GPS disponíveis para o emprego na recepção dos sinais GPS são (SEEBER, 1993, p. 230):

- a) monopolo ou dipolo;
- b) helicoidal;
- c) helicoidal-espiral;
- d) *microstrip* ou *patch*; e
- e) choke ring.

As antenas dipolo são as mais comuns dentre as várias categorias de antenas, enquanto as antenas monopolo são antenas abertas que atuam como parte de um dipolo. As antenas helicoidais quadrifilares são usadas freqüentemente em receptores de navegação (LANGLEY, 1998, p. 52) enquanto as antenas do tipo helicoidal-espiral praticamente sucumbiram (SEEBER, 2003, p. 236).

Atualmente, as antenas de maior emprego nos receptores GPS são as do tipo *microstrip* ou *patch*, que se tornaram populares nos anos 70 inicialmente nas atividades espaciais e atualmente governam as aplicações comerciais (BALANIS, 1998, p. 5). A antena *microstrip* consiste de uma placa condutora de circuito impresso montada sobre uma base quadrada, isolados por um dielétrico, normalmente uma camada de ar. Nas antenas mais aprimoradas, o material de isolamento empregado é uma espécie de porcelana. A figura 12 ilustra um exemplo de antena *microstrip*.

FIGURA 12—ANTENA MICROSTRIP



Fonte: PLUNDAHL (2003).

Nota: traduzido pelo autor.

As antenas *microstrip*, a exemplo das antenas GPS, são utilizadas normalmente para a recepção de ondas planares com polarização destrógiara (seção 2.2.1, figura 7) (DIERENDONCK, 1996, p. 341). Estas antenas podem ser de construção simples, compactas, de baixo custo de fabricação e ser empregadas em receptores GPS portáteis (receptores de navegação), em especial quando a antena é integrada ao corpo do receptor. As antenas destinadas às aplicações de alta precisão, denominadas antenas geodésicas, devem ser capazes de receber ambas as frequências  $L_1$  e  $L_2$ .

O centro de fase das antenas GPS (seção 2.2.4) sofre alterações decorrentes das propriedades eletromagnéticas da antena, as quais dependem das características



construtivas das mesmas (TRANQUILLA e COLPITTS, 1989, p. 5). Dentre estas características, citam-se: forma e tipo de material dos elementos individuais, plano de terra e radomes<sup>14</sup>. MENGE (2003, p. 136) afirma que alterações de até 7 mm na componente vertical do PCO (seção 2.2.4) da portadora  $L_1$ , providas da instalação de planos de terra em antenas modelo TRM22020.00–GP, têm efeitos consideráveis sobre as PCV dependentes de elevação.

#### 2.2.4 Descrição do Centro de Fase e das Variações do Centro de Fase da Antena

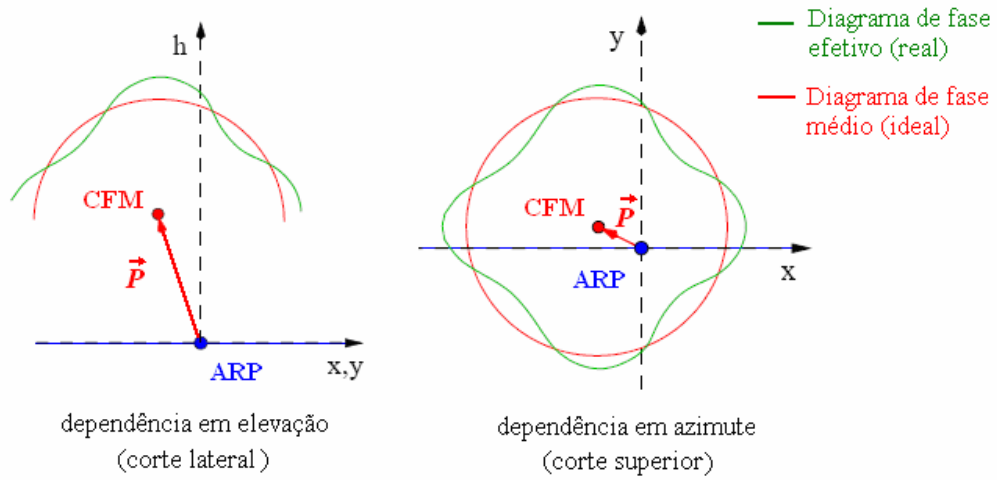
Assume-se que as ondas eletromagnéticas geradas pelos satélites GNSS percorrem um caminho direto através da atmosfera. Em recepção, os sinais incidem na antena do receptor no chamado centro de fase eletrônico ou centro de fase da antena, definido como ponto de recepção efetivo, o qual não coincide necessariamente com o centro geométrico da antena. Na definição do centro de fase é pressuposto que toda medição de fase da portadora esteja vinculada a um ponto físico na antena. Uma vez estabelecido, este ponto de referência da antena ou ARP (ingl. *Antenna Reference Point – ARP*) constitui a origem de todas as operações de centragem externa da antena, e.g., da medição de altura do instrumento em relação a um marco. Conforme o IGS, o ARP é o ponto materializado pela intersecção do centro da rosca de centragem, localizada na superfície inferior da antena, com o eixo de simetria do instrumento. Assim, o ARP é a origem do sistema de coordenadas da antena, dado por um sistema topocêntrico local com a antena orientada ao norte.

As antenas GNSS (e.g., antena *microstrip*) e suas características construtivas manifestam propriedades eletromagnéticas que causam alterações na recepção do sinal, originando desvios da fase em relação ao diagrama de fase ideal (seções 2.2.2 e 2.2.3). Estas alterações, denominadas variações do centro de fase (ingl. *Phase Center Variation – PCV*), são concebidas como grandezas geométricas dadas em função do ângulo de incidência do sinal na antena. Pode-se discriminá-las em duas partes: a dependência em elevação e a dependência em azimuth, conforme ilustra a figura 13.

---

<sup>14</sup> Radome: estrutura acoplada sobre a antena GNSS que serve de proteção contra intempéries.

FIGURA 13–ERROS DE FASE DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO E AZIMUTE



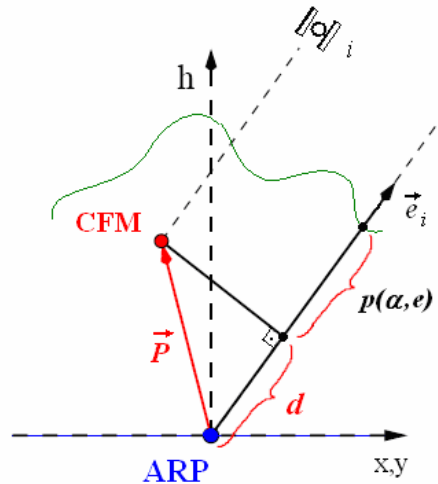
O centro de fase, quando deduzido a partir de sinais providos de todas as direções de um determinado segmento esférico, é denominado centro de fase médio (CFM). Em princípio, o CFM é uma aproximação do comportamento real do centro de fase da antena, ao mesmo tempo em que é o centro de uma superfície esférica que corresponde ao diagrama de fase médio ou ideal (isotrópico) que mais se aproxima do diagrama de fase efetivo (MENGE, 2003, p. 61). O vetor com origem no ARP e extremidade no centro desta superfície esférica é denominado deslocamento do centro de fase (ing. *Phase Center Offset - PCO*) e exprime as coordenadas cartesianas do CFM nas componentes horizontais  $x$  (direção norte) e  $y$  (direção leste) e na componente vertical  $h$ :

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ h \end{pmatrix}. \quad (2.23)$$

As variações do centro de fase são grandezas geométricas que expressam as alterações do estado da fase da portadora em dependência da direção do sinal incidente (seção 2.1.4.3). GEIGER (1988, p. 11) apresenta uma função para deduzir as correções do centro de fase mediante o conhecimento do ponto de referência da antena (ARP) e dos valores das variações do centro de fase associadas a um CFM. Na figura 14,

observa-se que a direção do sinal de satélite é descrita pelo azimute  $\alpha$  e pela elevação  $e$  no sistema de coordenadas da antena.

FIGURA 14–DEDUÇÃO DAS VARIAÇÕES DO CENTRO DE FASE



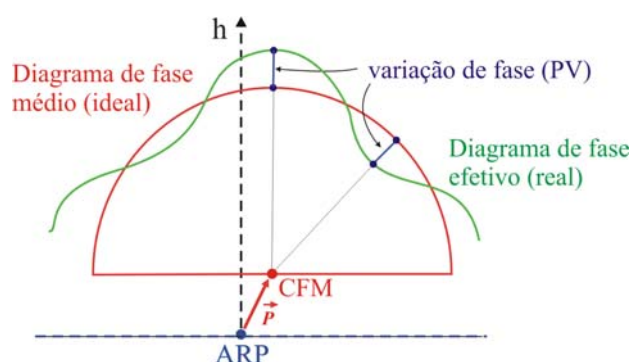
Após a determinação das coordenadas do CFM no sistema de referência da antena (seção 2.3.1), determina-se o termo de correção dependente da direção do sinal  $p(\alpha, e)$  por meio de polinômios, poligônios ou desenvolvimento de funções esféricas (WANNINGER, 2002a, p. 52). O termo  $d$  é a medida algébrica da projeção do vetor  $\vec{P}$  sobre a direção do vetor unitário  $\vec{e}$  na direção de um satélite  $i$  (VENTURI, 1990, p. 84). A soma da medida da projeção  $d$  com as correções  $p(\alpha, e)$  fornece a correção procurada  $dr$  (equação 2.24):

$$dr(\alpha, e) = \vec{P} \cdot \vec{e}_i + p(\alpha, e) . \quad (2.24)$$

As variações do centro de fase (PCV) representam a variabilidade do centro de fase em função da direção de incidência do sinal. Conforme MENGE (2003, p. 62), elas expressam, através do PCO, as distâncias remanescentes entre o diagrama de fase efetivo (real) e o diagrama de fase médio (ideal) que mais se aproxima do comportamento real. Portanto, as PCV descrevem o estado de retardo ou adiantamento da fase em relação ao diagrama de fase médio, o qual é vinculado a uma referência pontual teórica (CFM). Tratam-se das variações de fase, designadas por PV (al.

*Phasenvariationen*), conforme prescreve a norma DIN/NA Bau (2003). As variações de fase são conhecidas na literatura por variações do centro de fase (ingl. *Phase Center Variation – PCV*). A figura 15 ilustra uma interpretação destas variações de fase associadas a um CFM, determinadas a partir da comparação do comportamento real da antena – expresso pelo diagrama de fase efetivo – com o modelo ideal – representado por uma superfície média de referência.

FIGURA 15–INTERPRETAÇÃO DO CENTRO DE FASE MÉDIO E VARIAÇÕES ASSOCIADAS



Fonte: WANNINGER (2002, p. 52).  
Nota: modificado pelo autor.

Observa-se que as PCV e o ponto de referência (CFM) ao qual elas estão vinculadas constituem um conjunto de parâmetros a serem deduzidos via calibração (seção 2.3). Uma vez determinadas as coordenadas do CFM (PCO) e as PCV associadas, constituir-se-á um agrupamento de correções indissolúvel, i.e., as PCV podem ser interpretadas apenas mediante o PCO para o qual elas correspondem.

Todavia, os PCO podem ser alterados para outros valores desde que as PCV se desloquem junto segundo uma relação na qual a variação aplicada nas coordenadas de referência (PCO) seja acompanhada por uma variação das PCV exatamente proporcional. Em tal caso, qualquer que seja a referência para a qual as PCV estão vinculadas, o conjunto corresponde com univocidade ao comportamento do centro de fase delineando ações corretivas idênticas. Assim, infinitas composições entre PCO e PCV podem ser formadas para a consecução das mesmas correções  $dr(\alpha, e)$ . A equação 2.24 pode ser escrita na forma:

$$dr^f(\alpha, e) = \vec{P}^{f,n} \cdot \vec{e}_i(\alpha, e) + p^{f,n}(\alpha, e) \quad (2.25)$$

onde  $f$  é a frequência da portadora ( $L_1$  ou  $L_2$ ) e  $n$  indica o grupo de correção (PCO e PCV correspondentes). As componentes norte, leste e vertical do vetor unitário como função da direção do satélite (azimute  $\alpha$ , elevação  $e$  ou ângulo zenital  $z$ ) podem ser representadas no sistema topocêntrico (MENGE, 2003, p. 63):

$$\begin{aligned} \vec{e}_x &= \vec{e}_{norte} = \cos \alpha \sin z = \cos \alpha \cos e \\ \vec{e}_y &= \vec{e}_{leste} = \sin \alpha \sin z = \sin \alpha \cos e \\ \vec{e}_h &= \vec{e}_{vertical} = \cos z = \sin e. \end{aligned} \quad (2.26)$$

A partir da equação 2.25 pode-se realizar o transporte das PCV para qualquer PCO de referência. Sejam dois grupos de correções 1 e 2 distintos mas que satisfazem as mesmas relações entre PCO e PCV, almeja-se converter as PCV do grupo 2 para o PCO de referência do grupo 1:

$$\vec{P}^{f,1} \cdot \vec{e}_i(\alpha, e) + p^{f,1}(\alpha, e) = \vec{P}^{f,2} \cdot \vec{e}_i(\alpha, e) + p^{f,2}(\alpha, e) \quad (2.27)$$

As PCV  $p^{f,2}(\alpha, e)$  associadas ao PCO do grupo 1 são determinadas isolando-se o termo  $p^{f,1}(\alpha, e)$  da equação 2.27:

$$\begin{aligned} p^{f,2}(\alpha, e) &= \vec{P}^{f,1} \cdot \vec{e}_i(\alpha, e) - \vec{P}^{f,2} \cdot \vec{e}_i(\alpha, e) + p^{f,1}(\alpha, e) \therefore \\ &= p^{f,1}(\alpha, e) - (\vec{P}^{f,2} - \vec{P}^{f,1}) \cdot \vec{e}_i(\alpha, e) \therefore \\ &= p^{f,1}(\alpha, e) - \Delta \vec{P}^f \cdot \vec{e}_i(\alpha, e). \end{aligned} \quad (2.28)$$

Introduzindo o vetor unitário  $\vec{e}$ , tem-se:

$$p^{f,2}(\alpha, e) = p^{f,1}(\alpha, e) - \begin{vmatrix} \Delta x_p^f \\ \Delta y_p^f \\ \Delta z_p^f \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \cos \alpha \cos e \\ \sin \alpha \cos e \\ \sin e \end{vmatrix} \quad (2.29)$$

Se apenas a componente vertical do PCO for alterada, a equação 2.29 é escrita na forma simplificada:

$$\begin{aligned} p^{f,2}(\alpha, e) &= p^{f,1}(\alpha, e) - \Delta z_p^f \sin e \\ &= p^{f,1}(\alpha, e) - \Delta h^f \sin e. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Como exemplo prático, esta transformação é realizada quando se necessita comparar resultados de diferentes calibrações<sup>15</sup>.

Além da dependência em direção, incluída na descrição das PCV, deve-se também considerar a dependência da frequência do sinal. Na formação das combinações lineares entre as portadoras  $L_1$  e  $L_2$ , são geradas, pelo mesmo processo, as PCV de ambos os sinais. Com isso, originam-se diferentes PCV para os sinais de qualquer combinação linear. O equacionamento da combinação linear  $L_0$ , por exemplo, resulta na forma (MENGE, 2003, p. 65):

$$\begin{aligned} dr^{L_0}(\alpha, e) &= \left( \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) dr^{L_1}(\alpha, e) - \left( \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) dr^{L_2}(\alpha, e) \therefore \\ &= 2,5457 dr^{L_1}(\alpha, e) - 1,5457 dr^{L_2}(\alpha, e) \end{aligned} \quad (2.31)$$

Somente por meio de métodos de calibração podem ser determinados os PCO individuais e as correspondentes PCV. Estes métodos podem ser classificados quanto à localidade das medições (laboratório ou campo), ao tipo de sinal empregado (artificial ou real) e à necessidade do emprego de uma antena de referência (método absoluto ou relativo). As práticas de calibração pelo método relativo (e.g. WANNINGER, 2002a) assim como os métodos absolutos em laboratório (e.g. SCHUPLER e CLARK, 2000) e em campo (WÜBBENA et al., 1996) vêm sendo investigados internacionalmente desde o início dos anos 90. A descrição dos métodos é apresentada na seção 2.3.

---

<sup>15</sup> Diferentes calibrações: entende-se como sendo operações independentes, normalmente realizadas com uma mesma antena ou com diversas antenas de mesma construção. Em virtude da não unicidade das observações GPS nas medições em campo (e.g., condições de multicaminho, máscara de elevação), obtêm-se diferentes valores de PCO (seção 2.3.1), o que invalida a comparação das PCV sem a prévia conversão dos respectivos PCO de cada grupo de correção para um valor comum. Diz-se que as PCV são compatibilizadas para um mesmo PCO de referência a fim de que possam ser comparadas entre si.

## 2.3 CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GPS

Desde o início das atividades geodésicas com o NAVSTAR-GPS, medições laboratoriais eram realizadas em torno da possibilidade de se determinar a ordem de grandeza das variações do centro de fase dependentes de azimuth e elevação (e.g., SIMS, 1985).

A partir de 1987 foram iniciadas as experiências com o emprego de câmaras anecóicas (seção 2.3.2) visando a calibração destas antenas. A maior parte dos estudos era realizada por meio de técnicas radiométricas para detecção e medição da energia do centro de fase e a determinação da amplitude e polarização das antenas GPS geodésicas utilizadas na rede do Serviço GPS Internacional (ingl. *International GPS Service – IGS*) (SCHUPLER e CLARK, 2000, p. 2499).

No início dos anos 90 iniciou-se o desenvolvimento de novos métodos de calibração de antenas GPS geodésicas. Os resultados do pós-processamento de uma linha de base conhecida com o emprego de observações de uma antena de referência calibrada constataram a possibilidade de determinar o diagrama de fase de antenas GNSS a partir das características da antena de referência (BREUER et al., 1995).

Paralelamente ao desenvolvimento de técnicas de calibração absoluta em câmaras anecóicas, cabe destacar o aprimoramento do método de calibração absoluta em campo de antenas de receptores GNSS. Este método foi proposto inicialmente para contornar as influências do efeito de multicaminho dos sinais GPS (MENGE et al., 1998). Os primeiros resultados foram obtidos a partir de 1996, inicialmente via procedimentos manuais (WÜBBENA et al., 1996; MENGE et al., 1998) e posteriormente via calibração absoluta automatizada (WÜBBENA et al., 2000a; WÜBBENA et al., 2000b; SCHMITZ et al. 2002).

O objetivo da calibração de antenas de receptores GNSS é a determinação dos parâmetros definidores das coordenadas do PCO e dos correspondentes termos das PCV dependentes de azimuth e elevação. Conforme MENGE (2003, p. 70), os atuais métodos para estas determinações são:

- a) determinação do PCO;
- b) calibração absoluta em ambientes controlados, e.g., câmaras anecóicas;

- c) calibração absoluta em campo;
- d) calibração relativa em campo;

Na seqüência, apresenta-se uma descrição geral dos métodos empregados atualmente na calibração de antenas GNSS. Entre outras publicações de importância para o tema pesquisado, recorreu-se aos seguintes trabalhos para a fundamentação e encadeamento teórico deste assunto: ROTHACHER et al. (1995), MADER (1999), SCHUPLER e CLARK (2000), ROTHACHER e SCHMID (2002), WÜBBENA et al. (2000), WANNINGER (2002) e MENGE (2003).

### 2.3.1 Determinação das coordenadas do CFM

As coordenadas do centro de fase médio, definidas pelo vetor PCO, são vinculadas a um ponto de referência mecânico na antena, definido como a origem de um sistema de referência de coordenadas cartesianas (seção 2.2.4). A determinação da componente vertical do PCO como função das PCV dependentes de elevação torna-se uma tarefa crítica em virtude de fatores associados à definição da constelação GPS. SEEBER (2003, p. 366) afirma que a componente vertical é particularmente sensível à configuração geométrica dos satélites e à influência de erros de refração atmosférica não-modelados. Ao contrário, as coordenadas horizontais do PCO podem ser determinadas em função das PCV azimutais por métodos simples (RYF, 1993). Em geral, caracterizam-se por valores na ordem de milímetros ou centímetros e se localizam próximos ao eixo de rotação da antena, dependendo do modelo de fabricação.

Conforme o método de calibração empregado, as componentes norte, leste e vertical do PCO podem ser deduzidas por meio das seguintes combinações de dados vetoriais:

- a) PCO relativo (vinculado a uma antena de referência);
- b) componentes norte e leste absolutas e componente vertical relativa; e
- c) PCO absoluto.

São disponíveis três métodos fundamentais para estas determinações (MENGE, 2003, p. 71):



- a) linha de base conhecida (base de calibração);
- b) intercâmbio de antenas;
- c) rotação horizontal da antena.

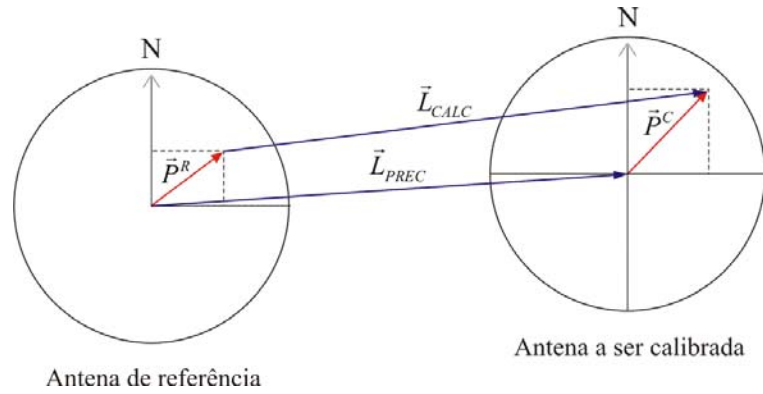
Eles são empregados como métodos de controle para a determinação do PCO ao mesmo tempo que são indispensáveis para a calibração das variações do centro de fase, e.g., a linha de base conhecida em combinação com as eventuais rotações horizontais da antena no método relativo (seção 2.3.4), assim como rotações e inclinações da antena no método absoluto em campo (seção 2.3.3).

No método da linha de base conhecida, determina-se com alta precisão uma linha de base  $\vec{L}_{PREC}$  empregando-se antenas de mesmo modelo em medições repetidas e de longa duração (e.g., 24 horas). O cálculo da diferença vertical entre o ARP das antenas é feito mediante nivelamento de alta precisão e as coordenadas de referência são comparadas com o resultado  $\vec{L}_{CALC}$  do processamento GPS. Atribuindo-se índice  $C$  à antena a ser calibrada e  $R$  à antena de referência nos termos de PCO, tem-se:

$$\begin{aligned}
 \vec{P}^R + \vec{L}_{CALC} &= \vec{L}_{PREC} + \vec{P}^C \therefore \\
 \vec{P}^C - \vec{P}^R &= \vec{L}_{CALC} - \vec{L}_{PREC} \therefore \\
 \Delta\vec{P}^{(C-R)} &= \vec{L}_{CALC} - \vec{L}_{PREC}.
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

A diferença  $\Delta\vec{P}^{(C-R)}$  entre o PCO da antena a ser calibrada ( $\vec{P}^C$ ) e o PCO da antena de referência ( $\vec{P}^R$ ) corresponde à diferença entre a linha de base verdadeira ( $\vec{L}_{PREC}$ ) e a calculada ( $\vec{L}_{CALC}$ ). O resultado é o PCO da antena a ser calibrada, relativo à antena de referência (figura 16).

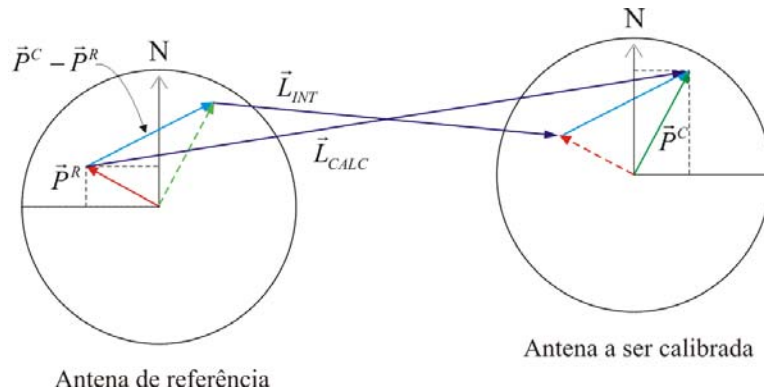
FIGURA 16–DETERMINAÇÃO DO PCO EM BASE CONHECIDA



No método do intercâmbio de antenas (figura 17), novas observações são realizadas após a troca das antenas entre pilares, introduzindo uma segunda linha de base denominada  $\vec{L}_{INT}$ . Neste caso, é dispensado o conhecimento da linha de base conhecida. O resultado também é o PCO da antena a ser calibrada relativo à antena de referência:

$$\begin{aligned}
 (\vec{P}^C - \vec{P}^R) + \vec{L}_{INT} &= \vec{L}_{CALC} - (\vec{P}^C - \vec{P}^R) \therefore \\
 2(\vec{P}^C - \vec{P}^R) &= \vec{L}_{CALC} - \vec{L}_{INT} \therefore \\
 \Delta\vec{P}^{(C-R)} &= \frac{1}{2}(\vec{L}_{CALC} - \vec{L}_{INT}).
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

FIGURA 17–DETERMINAÇÃO DO PCO PELO INTERCÂMBIO DE ANTENAS

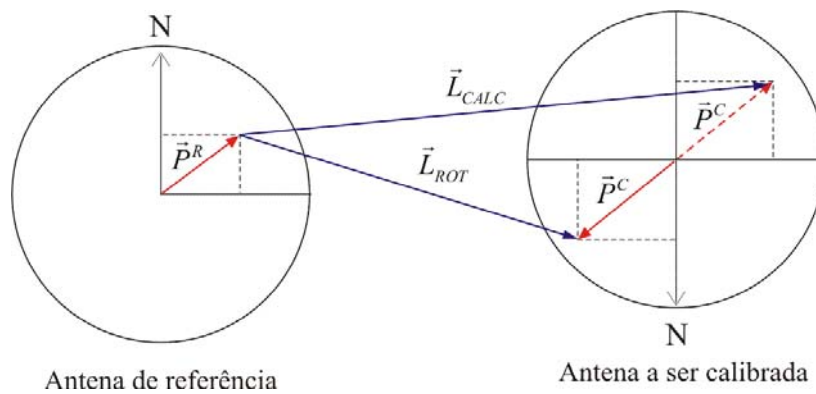


No método de rotação horizontal da antena a ser calibrada, novas observações são realizadas após a rotação da antena, introduzindo uma segunda linha de base denominada  $\vec{L}_{ROT}$ . No caso mais simples, são realizadas observações em duas direções

(e.g., norte e sul) conforme ilustra a figura 18. As componentes horizontais do PCO ( $\vec{P}_C$ ) são determinadas de forma absoluta e a componente vertical de forma relativa em relação à antena de referência.

$$\begin{aligned}
 \vec{L}_{CALC} - \vec{P}^C &= \vec{L}_{ROT} + \vec{P}^C \therefore \\
 2\vec{P}^C &= \vec{L}_{CALC} - \vec{L}_{ROT} \therefore \\
 P^C &= \frac{1}{2}(\vec{L}_{CALC} - \vec{L}_{ROT}).
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

FIGURA 18–DETERMINAÇÃO DO PCO PELA ROTAÇÃO DE ANTENAS

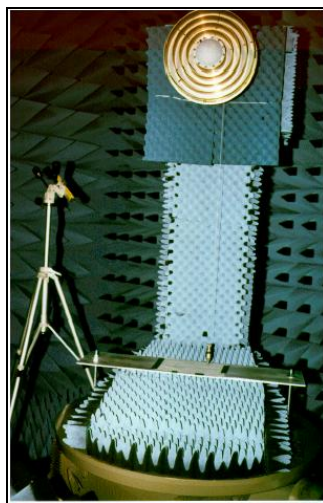


### 2.3.2 Calibração Absoluta em Câmaras Anecóicas

A calibração absoluta de antenas GPS em câmaras anecóicas<sup>16</sup> emprega sinais GPS simulados, irradiados por uma fonte fixa (antena transmissora) que incide uniformemente sobre a antena a ser testada. Esta é fixada em um suporte capaz de realizar rotações e inclinações da antena em torno de um ponto referenciado ao ARP (ROTHACHER e SCHMID, 2002, p. 124) (figura 19).

<sup>16</sup> Câmara anecóica (ingl. *anechoic chamber*). Por definição, “*anechoic*” significa baixo grau de reverberação. Uma câmara anecóica é, portanto, um ambiente que minimiza a quantidade de reflexão ou reverberação de ondas de diferentes tipos, incluindo frequências de rádio e microondas.

FIGURA 19–CALIBRAÇÃO ABSOLUTA EM CÂMARA ANECÓICA



Fonte: SCHUPLER e CLARK (2001, p. 49).

Conforme a antena é movimentada, a frequência do sinal emitido pela antena fixa é alterada em frequências discretas. O processo consiste em associar os dados de amplitude e resposta de fase à padrões de diretividade e eficiência (seção 2.2.2) contidos em um modelo que considera as propriedades mecânicas do suporte da antena, a variação da frequência e os efeitos gerados pelos movimentos aplicados na antena (SCHUPLER E KLARK, 2001, p. 49). A partir destas informações, é caracterizada a resposta eletrônica da antena para sinais de polarização circular levógira ou destrógira (seção 2.2.1). O processamento fornece, entre outras informações, as coordenadas do centro de fase (PCO) para cada frequência e os correspondentes diagramas de fase da antena (SCHUPLER e CLARK, 2000, p. 2501). As PCV absolutas são evidenciadas pelas variações em distância entre a antena transmissora e a antena a ser testada, i.e., determinadas por meio da alteração na fase da portadora ocasionada pelos movimentos intencionais de rotação e inclinação da antena no suporte.

As câmaras anecóicas oferecem a vantagem de garantir o isolamento de sinais eletromagnéticos em seu interior, uma vez que os sinais refletidos são praticamente eliminados. Contudo, elas apresentam estruturas complexas quanto ao instrumental

mecânico e aos elementos computacionais, além de dispendiosos procedimentos de medição e alto custo operacional.

SCHUPLER e CLARK (1991) mostraram em experimentos laboratoriais que antenas GPS apresentam entre si características e propriedades eletrônicas diferentes ainda que sejam fisicamente similares. Citam-se outros trabalhos dos mesmos autores, e.g., SCHUPLER e CLARK (2000) e SCHUPLER e CLARK (2001) nos quais é apresentado o desenvolvimento teórico e experimental deste método.

### 2.3.3 Calibração Absoluta em Campo

A calibração absoluta em campo foi idealizada pelo *Institut für Erdmessung* (IfE) da Universidade de Hannover, o qual delineou as primeiras instruções deste método de calibração, inicialmente de forma manual (WÜBBENA et al., 1996) e posteriormente inaugurando a automação dos procedimentos (WÜBBENA et al., 2000a e 2000b).

O princípio do método, e ao mesmo tempo pré-requisito para a descrição precisa das PCV, é a determinação e separação dos erros contidos nas observações GPS (SCHMITZ, 2001, p.102), e.g., as variações do centro de fase e a influência do efeito de multicaminho (seção 2.1.4.3), que são erros distintos e independentes, ambos provenientes da estação de calibração (WÜBBENA et al., 2000b, p. 2513).

Neste processo, as medições são realizadas empregando uma antena de referência e a antena a ser calibrada, posicionadas em uma linha de base curta. Para minimizar as influências atmosféricas e erros orbitais, é determinada a dupla-diferença de fase das observações (seção 2.1.4) através da qual são suprimidos os erros de relógio e também as PCV (a serem determinadas). São realizadas observações da constelação GPS em dois dias siderais médios consecutivos. Em um dos dois dias de rastreio (normalmente, no segundo dia), a antena a ser calibrada é submetida a movimentos de rotação e inclinação em torno de um ponto conhecido, de forma que as PCV podem ser recuperadas como observáveis quando se compara os dois conjuntos de dados (SCHMITZ, 2001, p. 102).

Pressupõe-se que, em condições invariáveis do entorno da estação, o multicaminho se repete em mesmos períodos, podendo ser detectados e minimizados pela comparação entre os resíduos da dupla-diferença de fase das observações dos dois dias siderais (WÜBBENA et al., 2000, p. 2514). As PCV da antena a ser calibrada são detectadas na dupla-diferença de fase sem as influências das PCV e do efeito de multicaminho da antena de referência, que não são incluídas nos resultados uma vez que esta permanece inalterada. Portanto, embora se trate do processamento diferencial de uma linha de base, as PCV são obtidas absolutamente, sem dependência das características da antena de referência.

No início do desenvolvimento do método absoluto, a antena GNSS era instalada em um suporte de precisão que permitia rotações e inclinações da antena em ângulos discretos (MENGE et al. 1998). Atualmente, a calibração absoluta pode ser executada em tempo real com emprego de um mecanismo automatizado (figura 20) que realiza rotações e inclinações automáticas na antena a ser calibrada (WÜBBENA et al., 2000b).

O robô realiza movimentos programados, posicionando a antena em ângulos e azimutes variados para simular alteração da geometria dos satélites. Com isso, é possível adquirir observações homogêneas ao longo do hemisfério superior da antena incluindo ângulos de elevação abaixo de  $0^\circ$  (BÖDER et al., 2001).

A figura 21 ilustra a representação de uma seção de 24 horas de observações estáticas (esquerda) e uma seção de calibração em tempo real pelo método automatizado (direita), ambas realizadas na mesma estação, localizada em latitude média do hemisfério norte. Na figura da esquerda observa-se a situação real da constelação observada nesta região do hemisfério, onde são representadas as trajetórias (órbitas) dos satélites para elevações de  $0$  a  $90^\circ$  de elevação e azimutes de  $0$  a  $360^\circ$ .

Observa-se que nas medições em tempo real amplia-se a densidade de observações ao longo do hemisfério superior da antena, completando a ausência de

observações ocasionadas pelo chamado *north hole*<sup>17</sup>. A quantidade média de posições assumidas pela antena em um processo de calibração pode variar entre 6 a 8 mil, sendo finalizado quando alcançada uma cobertura completa do hemisfério da antena (WÜBBENA et al., 2000b, p. 2515).

FIGURA 20—ROBÔ DE CALIBRAÇÃO

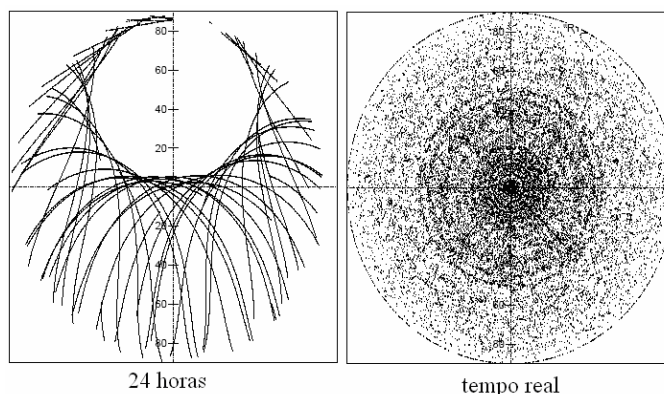


Ao contrário da calibração relativa (seção 2.3.4), o PCO e as PCV são determinados no mesmo processo. A modelagem é realizada por meio de funções esféricas, cujos baixos coeficientes correspondem às componentes do PCO (MENGE, 2003, p. 90). Conforme WÜBBENA et al. (2006a), a calibração absoluta em campo com emprego de robô fornece PCV absolutas com precisão melhor que 0,5 mm na portadora  $L_1$  e melhor que 1 mm na portadora  $L_2$ . Comparações entre os resultados deste método com os resultados da calibração absoluta em câmara anecóica mostraram que ambos os métodos conduzem a valores de calibração quase idênticos (ROTHACHER e SCHMID, 2002; GÖRRES et al., 2006). Mais informações sobre este método podem ser encontradas em SEEBER et al. (1997), WÜBBENA et al. (2000a, 2000b) e SCHMITZ et al. (2002) e MENGE (2003).

---

<sup>17</sup> *North hole* (ingl.): distribuição geométrica não uniforme da constelação GPS sobre os pólos da Terra que caracteriza uma determinada área (ou sombra) de aspecto circular não abrangida pelas órbitas dos satélites GPS.

FIGURA 21—OBSERVAÇÕES NO HEMISFÉRIO DA ANTENA



FONTE: WÜBBENA et al. (2000b).

#### 2.3.4 Calibração Relativa em Campo

O princípio de medição da calibração relativa em campo consiste na observação de uma linha de base curta e conhecida por longo período de tempo. Em uma estação opera a antena de referência e na segunda estação a antena a ser calibrada (figura 22).

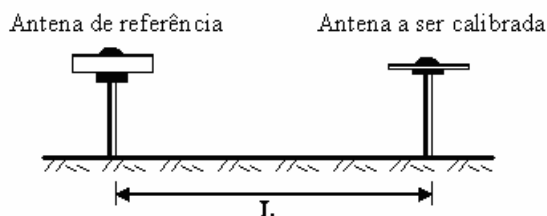
A linha de base curta, em geral de poucos metros, é o pressuposto para que as influências dos erros orbitais, da ionosfera e da troposfera se tornem ínfimas no processamento relativo. As medições de campo são normalmente condicionadas às características do entorno da estação, que condicionam a diferentes condições de multicaminho dos sinais. São necessários períodos de observação normalmente de 24 horas a fim de proporcionar cobertura de dados de satélites no hemisfério completo da antena e reduzir a influência do efeito de multicaminho (WANNINGER, 2000, p. 52).

Todas as diferenças entre as coordenadas determinadas na calibração e as coordenadas precisas da linha de base são consideradas como erros do centro de fase. Se forem formadas diferenças no plano das coordenadas, possibilita-se a determinação do PCO, e portanto, das correções das coordenadas da linha de base. Se forem consideradas diferenças superabundantes no plano das observações, são obtidas as PCV e conseqüentemente as correções das observações relativas. Esta modelagem pode ser realizada através de poligônios (ROTHACHER et al., 1995; KANIUTH et al.,



1998), polinômios (BREUER et al., 1995) ou funções de superfícies esféricas (ROTHACHER et al., 1995; WÜBBENA et al., 1996).

FIGURA 22—LINHA DE BASE CONHECIDA NA CALIBRAÇÃO RELATIVA



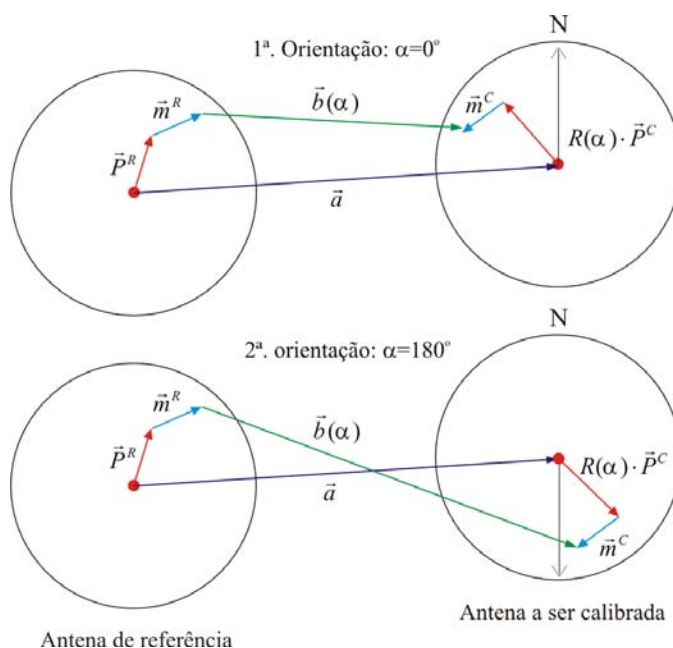
Este método é empregado nos procedimentos de calibração em campo do IGS/NGS, em que os PCO são determinados por meio do processamento da dupla-diferença de fase (seção 2.1.4, equação 2.7) e as PCV determinadas na simples diferença de fase (seção 2.1.4, equação 2.6) (MADER, 1999). É empregado um oscilador de rubídio para a geração de uma referência de frequência externa uma vez que as simples diferenças de fase podem acumular diferenças de tempo entre os receptores. As PCV são determinadas nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$  para observações de 24 horas em função apenas do ângulo de elevação dos satélites, desconsiderando a dependência azimutal. As observações são adquiridas a partir de máscara de elevação mínima de  $10^\circ$  em virtude do efeito de multicaminho e da cobertura insuficiente de observações próximo ao horizonte. A antena de referência normalmente usada é do tipo AOAD/M-T (seção 3.2.1), cujos PCO nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$  possuem valores pré-estabelecidos (seção 2.3.5).

O princípio de medição pelo método relativo pode ser aperfeiçoado por meio de rotações das antenas em torno de seu eixo central, inclinações da antena sobre um ponto conhecido (seção 2.3.3) ou intercâmbio de antenas (WANNINGER, 2000, p. 52). Quando a antena é rotacionada horizontalmente em torno de seu eixo mecânico e orientada sistematicamente em azimutes distintos durante as medições, são geradas observações superabundantes que contribuem para a redução do efeito de multicaminho (FREVERT et al., 2003, p. 2) e possibilita investigar o comportamento do centro de fase levando em conta o hemisfério completo da antena (SCHULTE e

FREDEBURG, 2001, p. 56). Na forma mais simples, a rotação da antena pode ser conduzida manualmente.

Com a rotação da antena a ser calibrada, o prévio conhecimento das coordenadas precisas (planas) da linha de base pode ser negligenciado uma vez que elas são estimadas no processamento (seção 2.3.1). Em tal caso, apenas a diferença vertical entre o ARP das duas antenas deve ser mensurada por nivelamento de alta precisão. Considerando apenas a componente horizontal, pode-se descrever a ação da rotação da antena como ilustra a figura 23.

FIGURA 23–DETERMINAÇÃO DAS COMPONENTES PLANIMÉTRICAS ABSOLUTAS DO PCO POR MEIO DE ROTAÇÕES DA ANTENA A SER CALIBRADA



Fonte: WANNINGER (2002a).

Observa-se que o vetor linha de base  $\vec{b}$  bidimensional, determinado a partir das observações de fase da portadora, não coincide com o vetor  $\vec{a}$ , o qual une o ARP das duas antenas. A antena de referência apresenta seu PCO indicado por  $\vec{P}^R$ . O efeito de multicaminho médio atuante nas estações é representado pelos termos  $\vec{m}^R$  e  $\vec{m}^C$ . Por meio da rotação da antena a ser calibrada, apenas o seu PCO ( $\vec{P}^C$ ) exerce influência na medição da linha de base.

Esta influência pode ser separada das outras componentes por meio da equação (WANNINGER, 2002a, p. 53):

$$\begin{aligned}\vec{b}(\alpha) &= \vec{a} - \vec{P}^R - \vec{m}^R + R(\alpha) \cdot \vec{P}^C + \vec{m}^C \therefore \\ &= \vec{s} + R(\alpha) \cdot \vec{P}^C\end{aligned}\quad (2.34)$$

onde

$$R(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}. \quad (2.35)$$

Ao invés das coordenadas verdadeiras do vetor linha de base (vetor  $\vec{a}$ ), o que é determinado de fato é o vetor  $\vec{s}$ , modificado pela influência do efeito de multicaminho médio entre o CFM da antenna de referência e o ARP da antenna a ser calibrada. Observa-se que as componentes horizontais do  $\vec{P}^C$  são livres do multicaminho, cuja influência é considerada constante ao longo do período de calibração.

A desvantagem do método relativo está na determinação do PCO pela comparação de coordenadas, o que caracteriza a dependência dessas observações com o centro de fase da antenna de referência. Entretanto, valores de calibração no nível absoluto também podem ser determinados quando se dispõem das correções absolutas da antenna de referência (seção 2.3.3). Apesar desta restrição que é a dependência de uma antenna de referência, o método de calibração de antenas pelo método relativo em campo tem ingressado com sucesso nas atividades geodésicas em razão de várias vantagens, dentre elas, o rendimento (MAYER, 2002, p. 124).

### 2.3.5 Considerações Sobre Níveis e Formatos de Calibração

As correções do centro de fase de antenas de receptores GPS se resumem em variações do centro de fase (PCV) vinculadas a um PCO, cujas componentes horizontais e verticais são referenciadas a um ponto de referência na antenna (seção 2.2.4). Na prática, este conjunto de correções pode se determinado conforme duas

realizações: absoluta ou relativa. Elas são também designadas “nível absoluto” e “nível relativo”. Enquanto no nível absoluto as correções do centro de fase independem das características do centro de fase da antena de referência (seção 2.3.2), no nível relativo as correções dependem, por definição, de uma antena de referência cujos PCO são estipulados por convenção.

Um exemplo é a antena AOAD/M\_T (seção 3.2.1), modelo de antena adotada pelo IGS/NGS para a calibração relativa, sendo também a mais usada nas estações integrantes da rede global do IGS. A componente vertical do PCO é fixado em 0,11 m na portadora  $L_1$ , 0,128 m na portadora  $L_2$  e valores nulos são atribuídos às componentes horizontais e às variações do centro de fase (MADER, 1999, p. 7). Estes valores compõem um conjunto de correções para esta antena, o qual representa, em princípio, uma realização particular através da qual são determinadas, exclusivamente, correções no nível relativo.

Estas correções foram internacionalmente difundidas, assim como empregadas na rede IGS, que é composta essencialmente por antenas AOAD/M\_T. Por esse motivo, a calibração relativa (nível relativo) ficou conhecida também como nível IGS, NGS, Dorne Margolin ou simplesmente realização da antena AOAD/M\_T. Estes valores de calibração das antenas AOAD/M\_T atendem as aplicações nas quais é possível utilizar as antenas orientadas sistematicamente em uma mesma direção. Ao contrário, devem ser consideradas correções absolutas quando se tratam de redes geodésicas de grande porte, e.g., redes globais, bem como em aplicações cinemáticas, nas quais não é possível obter a mesma orientação das antenas envolvidas (ROTHACHER, 2001, p. 58).

Por se tratar de diferentes realizações, o resultado de uma calibração depende da espécie de correção existente para a antena de referência, a qual determina em qual realização será orientado o processamento da calibração. Desse modo, se forem empregadas antenas de referência calibradas pelo método absoluto (e.g., Geo++/IfE) no âmbito do método relativo com rotação da antena a ser calibrada (seção 2.3.4), podem ser obtidos os modelos de calibração no nível absoluto.

Dessa forma, não é possível realizar comparações entre informações em diferentes níveis de calibração. A comparação, i.e., a conversão das PCV (equação 2.25) entre o nível absoluto e o nível relativo fundamenta-se no fato de que a diferença das PCV absolutas entre duas antenas  $A$  e  $B$  deve ser igual à diferença das PCV relativas entre  $A$  e  $B$  (MENGE, 2003, p. 116):

$$dr^{abs}(A) - dr^{abs}(B) = dr^{rel}(A) - dr^{rel}(B), \quad (2.36)$$

e da mesma forma os PCO, aos quais são associadas as referidas PCV

$$\vec{P}^{abs}(A) - \vec{P}^{abs}(B) = \vec{P}^{rel}(A) - \vec{P}^{rel}(B). \quad (2.37)$$

Introduzindo as correções relativas e absolutas da antena AOAD/M\_T na equação 2.38, os PCO relativos de qualquer antena ( $B$ ) podem ser convertidos para o nível absoluto:

$$\vec{P}^{abs}(B) = \vec{P}^{abs}(AOA) - \vec{P}^{rel}(AOA) + \vec{P}^{rel}(B). \quad (2.38)$$

Assim, a partir da equação 2.36, com a introdução das PCV relativas e absolutas da antena AOAD/M\_T, tem-se as PCV no nível absoluto da antena  $B$  associadas ao PCO obtido da equação 2.38 (SCHMITZ, 2005):

$$\begin{aligned} dr^{abs}(AOA) - dr^{abs}(B) &= dr^{rel}(AOA) - dr^{rel}(B) \therefore \\ dr^{abs}(B) &= dr^{abs}(AOA) - dr^{rel}(AOA) + dr^{rel}(B). \end{aligned} \quad (2.39)$$

Na transformação entre níveis de calibração, deve-se considerar as convenções internacionais usadas na representação e processamento de resultados de calibração de antenas GNSS (WANNINGER, 2004b). Além da conversão e da aplicação das correções em diferentes níveis e nos correspondentes formatos, deve-se considerar a forma de emprego das correções da antena no pós-processamento e em tempo real.

No posicionamento em tempo real, as informações devem ser transmitidas por meio de técnicas especiais, e.g., com emprego do formato de correções da RTCM SC104 (ingl. *Radio Technical Commision For Maritime Services, Special Committee*

*n° 104*) (RTCM, 2001). Informações expressas sobre a identificação da antena e o tipo de realização das correções empregadas são disponibilizadas na atual versão RTCM 2.3. A esta versão pertencem as mensagens tipo 23 e 24, que contêm as informações das PCV e o do ARP das antenas. No pós-processamento, a identificação da antena (número de série e modelo) e as componentes do PCO em relação ao ARP podem ser informadas no cabeçalho do arquivo RINEX (ingl. *Receiver Independent Exchange Format*), que associa estes dados aos arquivos que contêm as correções. Assim, o usuário decide sobre as correções a serem empregadas.

Os arquivos de correção são compostos pelos PCO e pelas PCV associadas, podendo se apresentar em representações distintas e armazenados em arquivos de diferentes formatos, visualizados no quadro 4:

QUADRO 4 – FORMATO DOS ARQUIVOS DE CORREÇÃO

FORMATO	NÍVEL	PCV ELEVAÇÃO	PCV AZIMUTE E ELEVAÇÃO	EXTENSÃO
ANTEX	absoluto	sim	sim	ATX
IGS/NGS	relativo	sim	não	APC
Geo++	absoluto	sim	sim	ANT
Bernese	absoluto	sim	sim	BRN

Fonte: adaptado de WANNINGER (2004, p. 8).

Os resultados das calibrações de antenas GPS eram dados apenas no formato IGS/NGS, proposto em 1996 pelo IGS. Com a possibilidade de se determinar valores absolutos de calibração a partir de medições em campo, surgiu a necessidade de empregar não apenas PCV dependentes de elevação como também PCV dependentes de azimuth e elevação (seção 2.2.4). Em 2003, na ocasião da introdução do formato ANTEX (ingl. *Antenna Exchange Format*) pelo IGS, as correções necessárias ao nível AOAD/M\_T foram adaptadas para o nível absoluto (ROTHACHER E SCHMID, 2004).

Atualmente, o IGS/NGS disponibiliza também valores absolutos além dos valores obtidos por método de calibração relativa (MOORE e WEBER, 2002). Elas são determinadas por meio da transformação dos resultados relativos a partir dos dados da calibração absoluta da antena AOAD/M\_T, admitindo-se a realização da antena

AOAD/M\_T como referência padrão do método relativo (MENGE, 2003, p. 120; SCHMITZ, 2005). A transformação entre níveis e a transposição entre formatos é considerada uma tarefa complexa, assim como a comparação entre conjuntos de valores de correção (PCO e PCV) e a sintetização de correções individuais das antenas em correções específicas de grupos de antenas (e.g., IGS/NGS).

### 3 INVESTIGAÇÕES REALIZADAS NO INSTITUTO DE GEODÉSIA DE KARLSRUHE

A Alemanha é um dos países que desenvolve diversos trabalhos e investigações no âmbito da calibração de antenas GNSS. O quadro 5 mostra as principais instituições que atualmente realizam atividades de calibração, os métodos e o programa utilizado.

QUADRO 5 – INSTITUIÇÕES ALEMÃS E MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GNSS

INSTITUIÇÃO	MÉTODO DE CALIBRAÇÃO	PROGRAMA
Geo++ (Garbsen)	Absoluta com robô	GNPCV
Universidade de Hannover – IfE	Absoluta com robô	GNPCV
Universidade de Karlsruhe – GIK	Relativo em campo	WaSoft/Kalib
LGN Niedersachsen	Relativo em campo	WaSoft/Kalib
Universidade de Dresden	Relativo em campo	WaSoft/Kalib
Universidade de Bonn	Relativo em campo	Bernese

Em agosto de 2004 foram iniciados os experimentos de calibração de antenas de receptores GPS com instrumentação e infraestrutura disponibilizadas pelo Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (TH) – GIK. Os levantamentos foram conduzidos no terraço de medições (al. *Messdach*) do observatório astronômico (figura 25) situado nas dependências do GIK.

Conforme exposto na seção 1.4.2, dentre as principais metas a serem alcançadas, ressaltam-se:

- obter modelos que descrevam o centro de fase de algumas antenas de receptores GPS via procedimentos de calibração relativa em campo e processamento dos dados;
- analisar o efeito de multicaminho dos sinais nos resultados de calibração;
- investigar a influência do entorno da antena GPS receptora por meio da razão sinal-ruído (SNR);
- procurar separar os efeitos que influenciam as PCV advindas de diferentes meios, e.g., a arquitetura da antena, a forma e superfície do pilar e o entorno da estação;



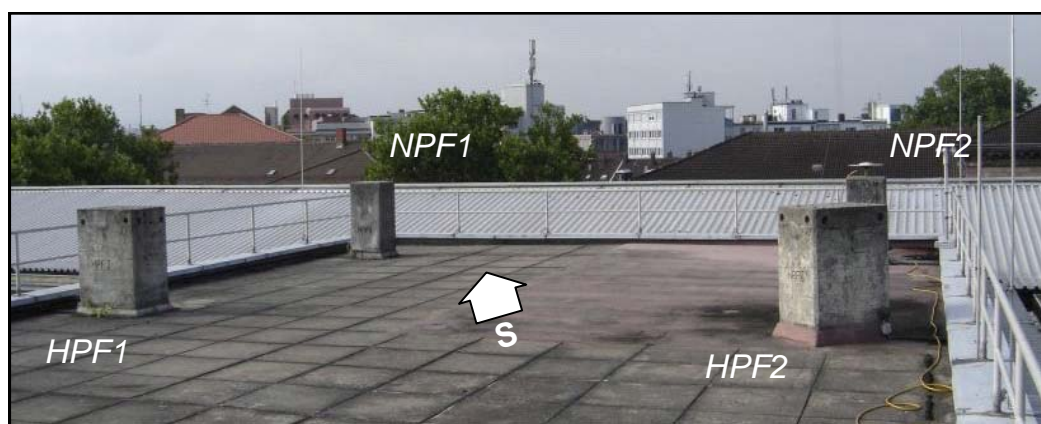
- e) transferir para o Brasil a tecnologia de calibração de antenas GNSS adquirida na Alemanha;

Neste capítulo apresentam-se a localização das estações de calibração (seção 3.1), a instrumentação e os programas utilizados (seção 3.2). São descritos os levantamentos de campo realizados visando a calibração de antenas bem como a seqüência de processamento dos dados (seção 3.3).

### 3.1 LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE CALIBRAÇÃO

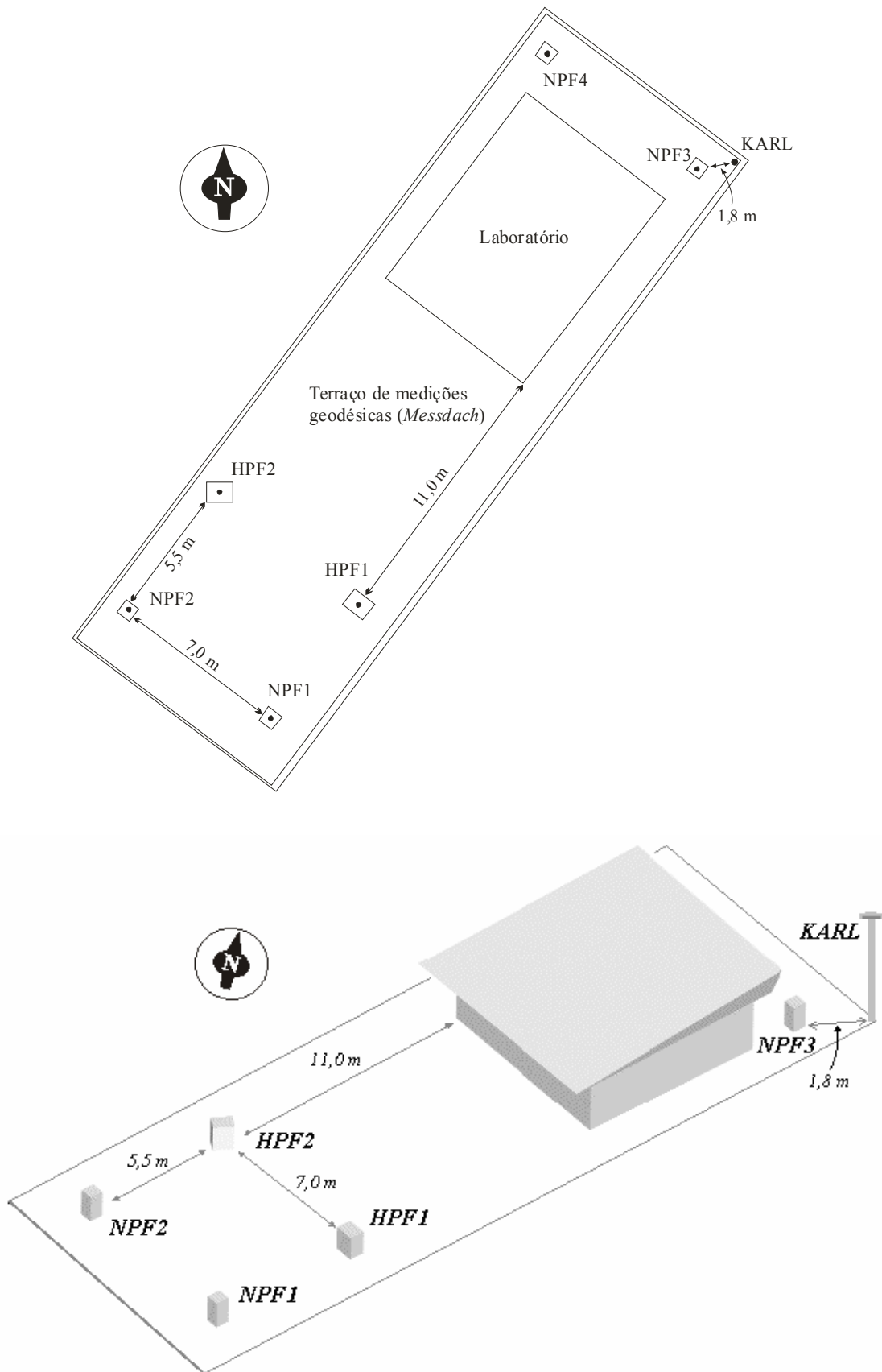
Nas investigações realizadas foram empregados os pilares HPF1, NPF1, HPF2, NPF2. A figura 24 ilustra a localização destes pilares no terraço de medições geodésicas. Na figura 25 apresenta-se a posição e orientação destes pilares em relação a estação KARL. Observa-se na figura 24 e na figura 25 que os pilares centrais (HPF1 e HPF2) e laterais (NPF1 e NPF2) possuem dimensões distintas (quadro 6). Eles também apresentam pequenas diferenças de rugosidade em sua superfície.

FIGURA 24—DISPOSIÇÃO DOS PILARES NO TERRAÇO DE MEDIÇÕES DO GIK



Os pilares ilustrados na figura 25 (exceto o pilar NPF3) foram empregados visando a realização de diversas calibrações de antenas GPS pelo método relativo, empregando-se antenas e receptores de diferentes modelos e fabricantes. Posteriormente, os processamentos dos dados foram executados com o auxílio de programas computacionais, apresentados na seqüência. As análises são apresentadas no capítulo 4.

FIGURA 25—ORIENTAÇÃO DOS PILARES NO TERRAÇO DE MEDIÇÕES DO GIK



QUADRO 6 – DIMENSÃO DOS PILARES

PILAR	DIMENSÕES [m]		
	LARGURA	COMPRIMENTO	ALTURA
HPF1	0,60	0,80	1,10
HPF2	0,60	0,80	1,10
NPF1	0,55	0,55	1,15
NPF2	0,55	0,55	1,15

### 3.2 INSTRUMENTAÇÃO E PROGRAMAS

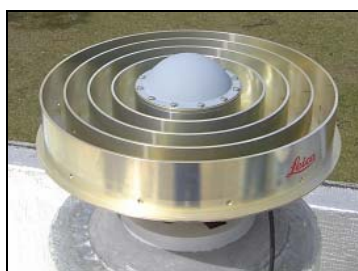
Conforme exposto, foram utilizadas antenas e receptores de diferentes modelos e fabricantes, os quais apresentam características distintas. Foi obtida uma superabundância de dados de calibração, que permitiu a realização de numerosa quantidade de análises e comparações visando distinguir o comportamento do sinal em relação às características arquitetônicas das antenas e ao efeito de multicaminho dos sinais. Na seqüência, apresenta-se o instrumental empregado nestas investigações.

#### 3.2.1 Antenas e Receptores GPS

Nas ilustrações seguintes apresentam-se os modelos de antenas e receptores empregados nesta pesquisa. Na figura 26 está representada a antena geodésica modelo Trimble Compact L1/L2+GP. O sufixo +GP assinala que ao elemento receptor está acoplado um plano de terra para repelir sinais de multicaminho provindos da reflexão no solo em levantamentos estáticos, enquanto o sufixo -GP indica ausência deste dispositivo. O IGS/NGS adota a designação TRM22020.00+GP para o primeiro caso e TRM22020.00-GP para o segundo caso.

A figura 27 ilustra uma antena tipo AOAD/M\_T (*Allen Osborne Associates Dorne Margolin Model T*), que possui o elemento receptor montado em um aparato de proteção contra o efeito de multicaminho, denominado *choke ring*, projetado pelo *Jet Propulsion Laboratory*. Ela é apropriada para o emprego em estações de referência (e.g., estações PARA e KARL) e denominada também Dorne Margolin\_T ou JPF D/M+CRT. O IGS/NGS designa este modelo de antena como TRM29659.00 (fabricante Trimble) e LEIAT504 (fabricante Leica).

FIGURA 26–ANTENA TRIMBLE COMPACT L1/L2+GP(TRM22020.00+GP)

FIGURA 27–ANTENA AOAD/M\_T *CHOKE RING* (TRM29659.00)

As antenas modelo TRM22020.00 e TRM29659.00 (*choke ring*) são as antenas empregadas com o receptor de dupla frequência Trimble 4000SSI (figura 28) para fins de medições geodésicas.

FIGURA 28–RECEPTOR TRIMBLE 4000SSI



Este receptor, em conexão com uma unidade coletora, permite a descarga dos dados em tempo real. Este procedimento é útil quando se dispõe de memória física insuficiente no receptor para levantamentos de longa duração. A figura 29 mostra a coletora do fabricante Trimble modelo TSC1.

FIGURA 29–COLETORA DE DADOS TRIMBLE TSC1



A figura 30 ilustra a antena Leica modelo AT502 L1/L2 *Aero Element*, denominada LEIAT502 conforme o IGS/NGS. A figura 31 mostra uma antena cinemática da mesma marca, mas do modelo AX1202 L1/L2 (LEIAX1202). Por serem pequenas e leves, são antenas apropriadas para levantamentos cinemáticos. Têm como desvantagem a vulnerabilidade ao efeito de multicaminho ante a ausência de um plano de terra.

FIGURA 30–ANTENA CINEMÁTICA LEICA AERO ELEMENT (LEIAT502)



FIGURA 31–ANTENA CINEMÁTICA LEICA AX1202 L1/L2 (LEIAX1202)



As antenas LEIAX1202 e LEIAT502 possuem características similares e são empregadas em conexão com o receptor GPS modelo Leica SR530, ilustrado na figura 32. A figura 33 exibe a unidade receptora Trimble 4800 (TRM4800), na qual receptor e antena são integrados em um único instrumento. Esta unidade é apropriada para a realização de levantamentos cinemáticos em tempo real (RTK). A figura 34 ilustra a unidade receptora Trimble 5800 (TRM5800). Trata-se de uma atualização da unidade TRM4800, cujas principais diferenças são dimensões menores que a versão anterior e a possibilidade de transmissão de dados em tempo real empregando técnica de transmissão sem cabos (ingl. *wireless*).

FIGURA 32–RECEPTOR GPS LEICA SR530



FIGURA 33–UNIDADE RECEPTORA TRIMBLE 4800 (TRM4800)



No quadro 7 apresenta-se um resumo das principais características das antenas e receptores empregados neste trabalho, que são identificados segundo a nomenclatura empregada pelo IGS/NGS, seguida pelo número de série do instrumento.

FIGURA 34–UNIDADE RECEPTORA TRIMBLE 5800 (TRM5800)



QUADRO 7 – IDENTIFICAÇÃO DAS ANTENAS E RECEPTORES

FABRICANTE	ANTENA	SN	CARACTERÍSTICAS	RECEPTOR	SN	PORTADORAS
Trimble	4800	4859	- antena e receptor integrados; - aplicações estáticas e cinemáticas (RTK); - rádio-modem;	4800	4859	L1/L2
	5800	5278	- antena e receptor integrados; - aplicações estáticas e cinemáticas (RTK); - rádio-modem; - <i>wireless</i>	5800	5278	
	TRM29659.00	7657	- <i>choke ring</i> ; - aplicação em estações de referência; - PCO (vertical) definido pelo NGS.	4000SSI	3214 3196	
	TRM22020.00	5816 5817 6926 7000 8413 8692 8918 9555 9556	- plano de terra; - aplicação estática: +GP ou cinemática: - GP;			
Leica	AX1202	0196	- sem plano de terra; - proteção lateral contra choques/quedas; - aplicações cinemáticas;	SR530	1075 1236	
	AT502	1325 1334 1954 1960 2709 2776 2819 3520 3614 4138 7189 8286	- sem plano de terra; - aplicações cinemáticas;			

### 3.2.2 Mecanismo DRB

Na seção 2.3.4 foi exposta a calibração de antenas GPS pelo método relativo, onde se mostrou a importância da aplicação de rotações horizontais na antena a ser calibrada. Estas rotações podem ser automatizadas com o emprego de um suporte controlado por computador, no qual a antena é fixada, e, durante as medições, a antena é constantemente orientada em azimutes programados.

O mecanismo DRB (*DrehRumBum*<sup>18</sup>) foi desenvolvido pela Faculdade Técnica de Dresden para atender experimentos científicos de naturezas diversas, em especial na área de calibração de antenas de receptores GNSS. Ele substitui o suporte de fixação de instrumentos geodésicos à base nivelante. Sua parte mecânica consiste essencialmente de um eixo móvel e um motor que executa movimentos de rotação no eixo principal do dispositivo (figura 35). Um programa computacional (e.g., AAKDD – seção 3.2.3.1) controla estes movimentos por meio de um módulo de interface que emite comandos de rotação em ângulos horizontais nas duas direções (destrógiro e levógiro) e com diferentes velocidades. O transformador de energia de alimentação do motor e o módulo de interface completam o sistema de rotação automatizado. O funcionamento do processo encontra-se na seção 3.2.3.1.

FIGURA 35–MECANISMO „DREHRUMBUM“ (DRB)



---

<sup>18</sup> *DrehRumBum*: vocábulo alemão sem significado e portanto sem tradução em português.



### 3.2.3 Programas Computacionais

Nesta seção, descrevem-se aspectos genéricos dos programas computacionais empregados para a execução de tarefas como:

- a) conversão de arquivos binários para o formato RINEX (programa TEQC);
- b) pós-processamento dos dados GPS (GPSurvey);
- c) processo de calibração de antenas GNSS (AAKDD, Wasoft/Kalib);
- d) extração e representação gráfica de dados (MATLAB);
- e) análise do efeito de multicaminho dos sinais (Wasoft/Multipath); e
- f) análise da razão sinal-ruído dos sinais (MATLAB) realizada com as rotinas desenvolvidas no programa MATLAB.

#### 3.2.3.1 AAKDD

O programa AAKDD foi desenvolvido pela Universidade Técnica de Dresden em linguagem Visual Basic 6.0. Ele controla os movimentos de rotação dos mecanismos DRB (seção 3.2.2). Sua tarefa principal é sincronizar as orientações do mecanismo DRB com o tempo GPS. Uma vez iniciado, o programa AAKDD reconhece o azimuth inicial do mecanismo e inicia a seqüência de rotações horizontais a partir da leitura da primeira época pelo receptor.

A figura 36 ilustra o esquema de operação do sistema para o funcionamento simultâneo de dois dispositivos DRB. A comunicação entre o computador e os dispositivos é realizada via Internet ou intranet. Os comandos do programa AAKDD são transmitidos via protocolo TCP/IP até o módulo de interface, que interpreta e transforma estes dados em impulsos elétricos, os quais são enviados via porta serial (RS232) para os motores dos dispositivos DRB.

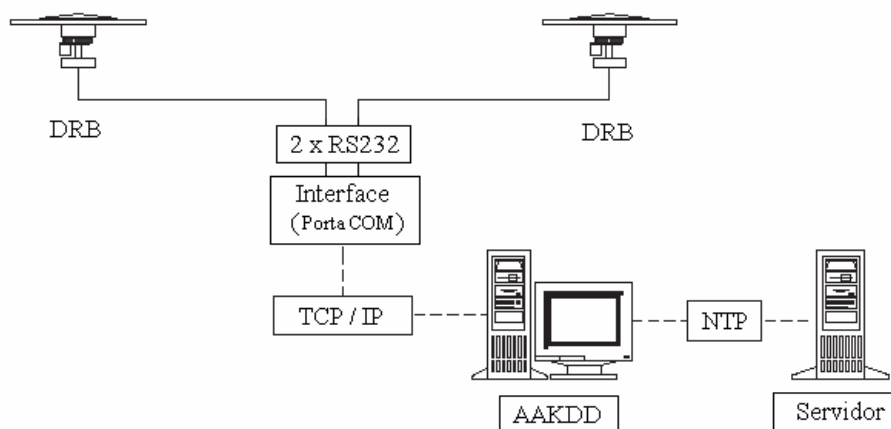
A sincronização do tempo sucede a cada hora através da conexão via Internet com um servidor NTP<sup>19</sup>, sendo também possível obter informações de tempo

---

<sup>19</sup> Servidor NTP (ingl. *Network Time Protocol*): Protocolo de internet usado para sincronizar os relógios de computadores (e alguns equipamentos de rede) com a referência de tempo padrão UTC.

diretamente do receptor GPS (FREVERT et al., 2003, p. 5). Assim, durante o processo de rotação da antena, os azimutes podem ser programados em conformidade com a taxa de gravação estabelecida. Os intervalos de giro podem ser configurados para cada 10, 15, 30, 60 ou 120 segundos e em até duas, quatro, seis ou oito direções azimutais. As medições conduzidas no âmbito deste trabalho foram realizadas com taxa de gravação de 15 segundos e quatro direções azimutais com incrementos de 90°. Assim, no período de um minuto completo foram realizadas observações com a antena orientada nos sentidos norte, sul, leste e oeste.

FIGURA 36—FUNCIONAMENTO DO PROCESSO DE ROTAÇÃO HORIZONTAL AUTOMATIZADA NA CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GPS PELO MÉTODO RELATIVO



Fonte: FREVERT et al. (2003).

Nota: Traduzido e modificado pelo autor.

A figura 37 ilustra a tela principal do programa. Nela, observam-se algumas características técnicas da antena 1 e do receptor a ela associado (e.g., número de série e modelo) bem como a taxa de gravação dos dados, a sequência de orientações a ser aplicada na antena, o tempo de duração das medições e as características da porta serial.

FIGURA 37–TELA PRINCIPAL DO PROGRAMA AAKDD

The screenshot shows the main window of the AAKDD software. The title bar is 'AAKDD'. The menu bar includes 'Ansicht', 'Bearbeite', 'DRB-Info', 'E-Mail', 'Report', and 'Ende'. There are tabs for 'Status', 'Antenne 1', and 'Antenne 2'. The 'Antenne 1' tab is active. The interface is divided into several sections for configuration:

- Antenne 1 Configuration:**
  - Punkt-Nr.: PF 13
  - Antennen-Nr.: 1229851
  - Motor-Nr.: 2
  - Positionen: N-S-W-O
  - Antentyp: Trimble Zephyr Geodetic
  - Aufz.-Rate: 15 Sekunden
  - Meßdauer: 24 Stunde
  - Empfänger-Nr.: 6270
  - Empfängertyp: Trimble 5700
  - Start: 01.04.2003
  - serielle Schnittstelle / Parameter: COM1 DRB
  - C-Ampel: 9600,n,8,1
  - Stop (d) h:min: 01.04.2003
  - Zyklen: 3
- Buttons:** Start, Stopp, Bemerkung (text input), Bemerkung (dropdown), Bem -> Log.
- Status Bar:**
  - Antenne 1: 200 gon
  - Antenne 2: 200 gon
  - no connection
  - <-PC-Zeit-> GPS: 14:06 42 55

### 3.2.3.2 Wasoft/Kalib

O programa Wasoft/Kalib<sup>20</sup> é um conjunto de módulos constituintes do programa Wasoft, desenvolvido para o pós-processamento e análise de observações GPS (WANNINGER, 2004a). Sua principal tarefa é a determinação das correções do centro de fase médio (PCO) e das correspondentes variações do centro de fase (PCV) de antenas GNSS calibradas pelo método relativo.

O programa admite o processamento de observações geradas a partir de rotações automáticas da antena em observações de 24 horas ou a partir da rotação manual em observações de quatro dias. É possível obter precisão submilimétrica nas componentes horizontais do PCO e precisão em torno de 1 mm na componente vertical do PCO e nas PCV (WANNINGER, 2007).

Por se tratar de um programa não-interativo, seu funcionamento depende do processamento sucessivo dos módulos por meio de comandos e opções, escritos diretamente na janela do sistema operacional (MS-DOS) ou executados via processamento de arquivos em lote. Os principais módulos do programa Wasoft/Kalib e suas funções são:

<sup>20</sup> Wasoft/Kalib: o programa se encontra na versão 1.2 para o sistema operacional *Windows*. Nestes experimentos foi empregada a versão 2.2 para o sistema operacional DOS. Conforme WANNINGER (2004a), não há alterações significativas frente às atualizações realizadas.

a) WASOFT: realiza o processamento da linha de base e a resolução das ambigüidades;

b) WANET: realiza a conferência da resolução das ambigüidades. É gerado um protocolo contendo, entre outras informações, os resultados da linha de base e a porcentagem de ambigüidades resolvidas.

c) WAANT: realiza a determinação dos valores de calibração, i.e, o PCO e as variações do centro de fase (PCV), possibilitando a saída destas correções em diferentes formatos (e.g., ANTEX, NGS, antigo IGS e Geo++). No apêndice 1 encontram-se as principais opções de operação do módulo WAANT.

A determinação das PCV dependentes de azimuth e elevação por método relativo em campo, empregando o programa WaSoft/Kalib e rotações (DRB) da antena a ser calibrada exige que:

- os valores de PCO e PCV da antena de referência existam e sejam aplicados;
- a antena a ser calibrada seja rotacionada em ritmo coordenado durante 24 horas de forma que se tenham medições em todos os azimutes;
- o efeito de multicaminho seja reduzido, uma vez que a qualidade dos resultados da calibração é dependente da influência do efeito de multicaminho na estação de referência e na estação de calibração.

O quadro 8 apresenta um fluxograma indicando a seqüência de emprego dos módulos necessários ao processo de calibração de antenas GNSS pelo método relativo. O processo inicia com a leitura dos dados no formato RINEX, provenientes dos levantamentos de campo conduzidos em 24 horas de rastreamento com o emprego do dispositivo DRB (seções 3.2.2 e 3.2.3.1). O programa realiza um teste inicial para verificar se a antena GPS foi rotacionada corretamente pelo mecanismo durante o período de observação. A partir dos dados de fase das duas portadoras, o módulo WASOFT determina as alterações de azimuth entre épocas para a repetição de movimentos da antena.

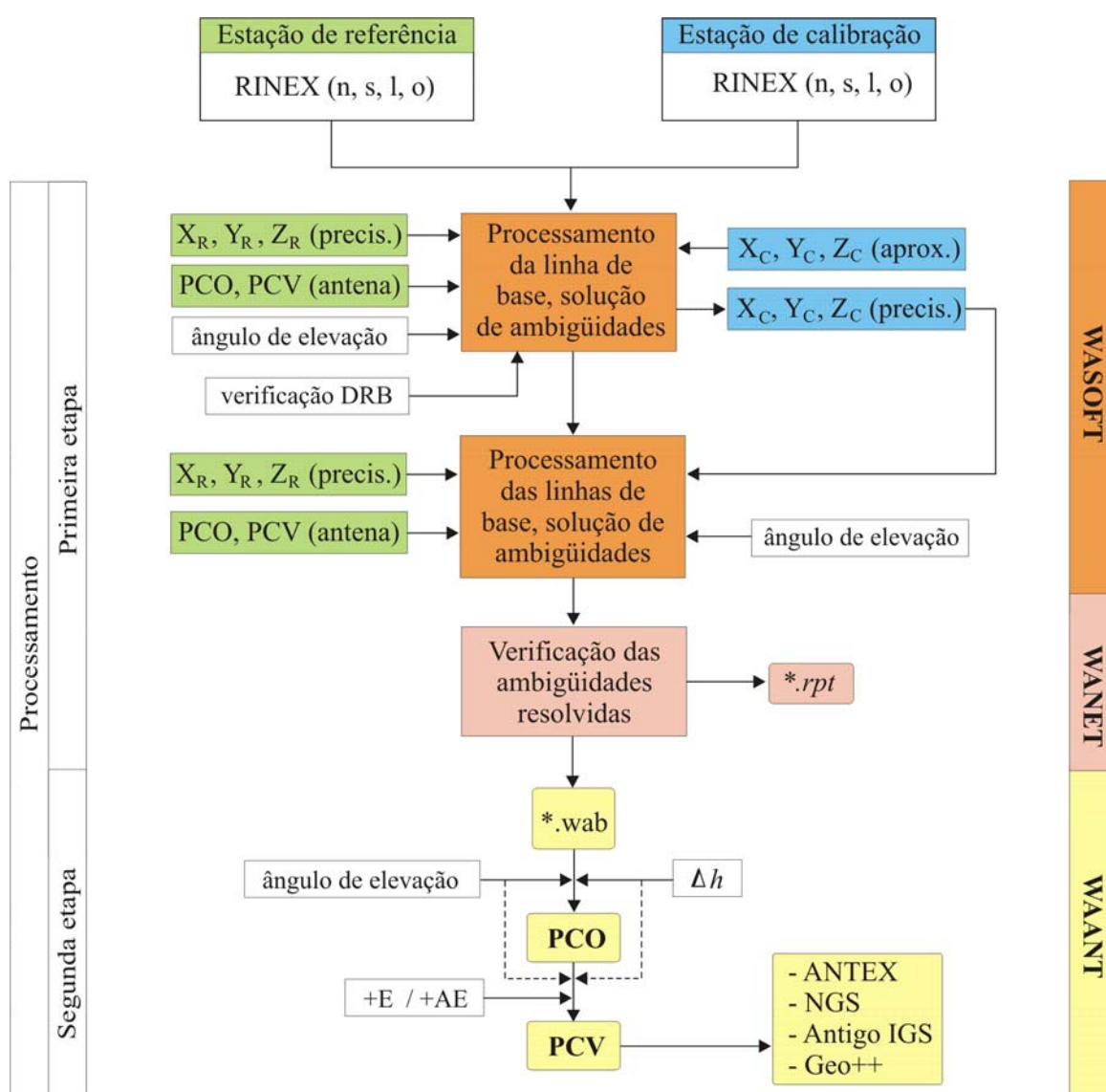
O processamento das observações consiste de duas etapas fundamentais:

- a) a determinação das linhas de base entre a estação de referência e a estação relativa; e

b) a determinação dos valores de correção da antena (PCO e PCV).

No caso da medição empregando rotações automáticas da antena, os arquivos originais devem ser decompostos em quatro arquivos separados, cada qual contendo as informações correspondentes às respectivas orientações assumida pela antena no processo de rotação. Na primeira etapa, o módulo WASOFT processa as observações de uma das orientações (normalmente a orientação norte) a fim de determinar a linha de base entre as estações.

QUADRO 8 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE PROCESSAMENTO COM OS MÓDULOS DO PROGRAMA WASOFT-KALIB



É gerado um arquivo de coordenadas precisas (coordenadas cartesianas em WGS-84 –  $X_C$ ,  $Y_C$ ,  $Z_C$ ) da estação de calibração, que devem ser aplicadas em um segundo processamento para determinar as linhas de base relacionadas a cada uma das quatro orientações. São também introduzidas as correções do centro de fase da antena da estação de referência e as coordenadas precisas da estação.

A verificação da solução das ambigüidades é realizada pelo módulo WANET, que gera um arquivo de protocolo contendo as informações do processamento das linhas de base e da solução das ambigüidades. Como resultados da execução do WASOFT obtêm-se, para cada linha de base, dois arquivos binários de extensão *wab* que são empregados pelo módulo WAANT no início da segunda etapa do processamento.

A determinação dos valores de correção da antena (segunda etapa) baseia-se nas soluções com ambigüidades fixadas. Esta determinação é dada em duas fases:

- a) cálculo das componentes planas do PCO (seção 2.3.1); e
- b) dedução das PCV dependentes de elevação (+E) e das PCV dependentes de azimute e elevação (+AE) (seção 2.3.4).

A componente vertical do PCO da antena a ser calibrada é determinada em relação à antena de referência. Assim, a diferença vertical provinda do processamento da linha de base é comparada com a diferença de nível ( $\Delta h$ ), determinada por nivelamento. A diferença decorrente é definida como excentricidade vertical (componente vertical do PCO) da antena a ser calibrada em relação à antena de referência.

Na determinação do PCO assim como das PCV dependentes de elevação, há duas possibilidades: determina-se de início os valores de PCO na primeira execução do programa WAANT, que devem ser novamente introduzidos no cálculo das PCV (opção +M) ou determinam-se o PCO e as PCV juntos em uma única execução do programa WAANT. No primeiro caso, as máscaras de elevação empregadas na determinação do PCO e das PCV podem ser diferentes, enquanto no segundo caso é válido apenas um valor de máscara de elevação para ambas as correções.

As PCV dependentes de azimuth e elevação são modeladas também em relação às características da antena de referência a partir dos resíduos da dupla-diferença de fase e parametrização por funções esféricas (WANNINGER, 2002, p. 53). Ao término do processamento, os resultados da calibração são armazenados em arquivos de texto com diferentes formatos, indicados no quadro 9. Na sequência, é feita breve descrição do conteúdo destas informações.

QUADRO 9 – PANORAMA DOS FORMATOS DE CORREÇÃO

FORMATO	PCO	PCV		DESVIO-PADRÃO	ARQUIVO
		ELEVAÇÃO (+E)	AZIM-ELEV (+AE)		
Padrão	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>rpt</i>
ANTEX	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>		<i>atx</i>
IGS/NGS	<i>x</i>	<i>x</i>			<i>apc</i>
Geo++	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>		<i>ant</i>
PCO	<i>x</i>				<i>pco</i>
Vetor		<i>x</i>	<i>x</i>		<i>pl1</i> <i>pl2</i> <i>pl0</i>

Fonte: WANNINGER (2004b).

Nota: modificado pelo autor.

Descrição do quadro 9:

a) Formato padrão do programa WAANT. No arquivo *rpt* (quadro 8) são gravadas as informações da calibração em um formato padrão. As medidas são dadas em metros e a convenção de sinais segue o formato Geo++. O arquivo *rpt* pode ser empregado como um protocolo de calibração e documentação das correções.

b) Formato ANTEX. O formato ANTEX foi testado desde março de 2003 no âmbito do IGS e aos poucos está substituindo o antigo formato IGS (ROTHACHER e SCHMID, 2006). Nele, é possível identificar o nível da correção (absoluta ou relativa), verificar se as correções se referem a um determinado grupo de antenas ou a antenas individuais. O formato ANTEX suporta todos os tipos de PCO e PCV, onde os conjuntos de dados de correção podem ser dispostos em um único arquivo.

c) Formato NGS ou antigo formato IGS. Nestes formatos, o PCO e as PCV dependentes de elevação (+E) determinados para um modelo de antena podem ser armazenados em um arquivo. Ambos os formatos são similares, exceto as primeiras

linhas do conjunto de correções. Valores nulos são atribuídos às correções caso não haja um valor de correção para ângulos de elevação baixos (e.g., abaixo de  $10^\circ$ ). Se for estimado apenas o PCO, é atribuído zero às PCV.

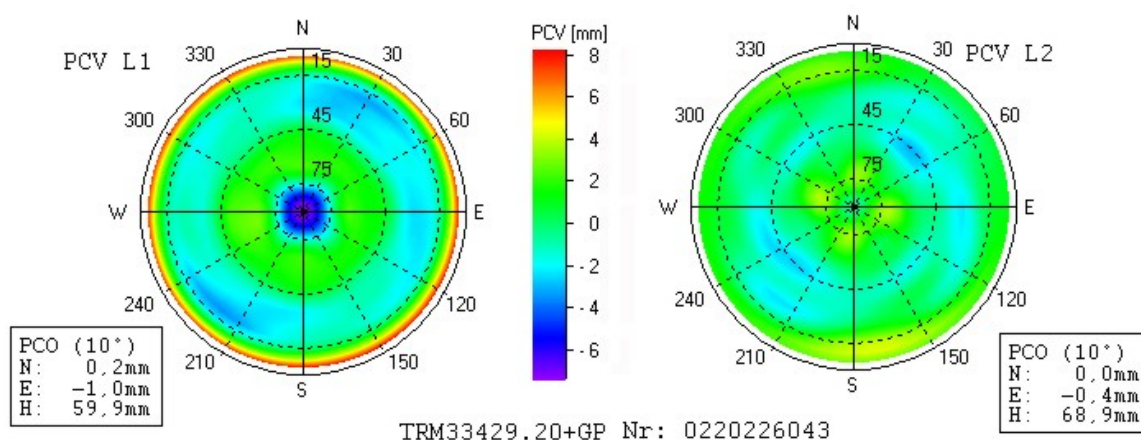
d) Formato Geo++. Ao contrário dos formatos ANTEX e IGS/NGS, todas as informações são dadas em metros e as PCV com os sinais contrários. Se não há observações em ângulos de elevação baixos, é atribuído zero às correções.

e) Formato PCO. Serve exclusivamente ao armazenamento intermediário dos resultados do PCO que devem ser introduzidos em nova execução do processo.

f) Formato vetorial. Permite a representação gráfica das PCV com outros programas (e.g., MATLAB). Os valores das PCV são dados em colunas, separados em três arquivos de dados com extensão *pl1*, *pl2* e *pl0* nas frequências  $L_1$ ,  $L_2$  e combinação linear livre de ionosfera, respectivamente.

O conteúdo destes arquivos podem ser acessados por rotinas computacionais específicas a fim de representar as PCV em diagramas. A figura 38 apresenta os resultados de uma calibração onde estão indicados os PCO em milímetros nas duas portadoras, a identificação e o modelo da antena calibrada. As correspondentes PCV podem ser representadas em diagramas polares por meio dos quais é possível avaliar a distribuição e intensidade dos erros do centro de fase.

FIGURA 38—RESULTADO DE CALIBRAÇÃO DE ANTENA GPS PELO MÉTODO RELATIVO COM EMPREGO DO PROGRAMA WASOFT-KALIB



Fonte: WANNINGER (2007).



Informações do emprego do programa Wasoft/Kalib em procedimentos de calibração pelo método relativo podem ser encontradas em WANNINGER (2004a) e FREIBERGER JUNIOR et al. (2004). A operação do programa é encontrada em mais detalhes na seção 3.3.2.

### 3.2.3.3 Wasoft/Multipath

O programa Wasoft/Multipath (versão 3.2) consiste em um conjunto de módulos pertencentes ao pacote Wasoft (WANNINGER e MAY, 2000, p. 132). Sua estrutura de funcionamento é similar à do programa Wasoft/Kalib (seção 3.2.3.2).

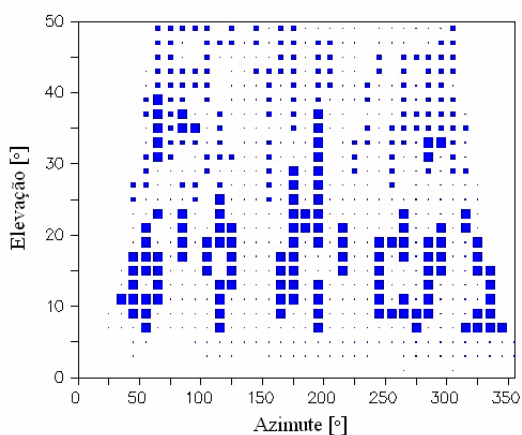
O Wasoft/Multipath permite a detecção, localização e quantificação das influências do multicaminho na fase da portadora. A execução do processo é realizada a partir de três a seis estações fixas que o programa estrutura em uma rede de estações de referência. Estas estações não devem distar mais que 100 quilômetros entre si e suas antenas devem ter coordenadas geodésicas conhecidas com precisão de um centímetro. São necessárias observações de 24 horas de rastreamento contínuo e simultâneo baseado em medições nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$ . Os módulos que constituem o programa Wasoft/Multipath são (WANNINGER, 2003a):

- a) WANJOI: converte as efemérides transmitidas no formato RINEX para o formato binário do programa Wasoft;
- b) WASING: determina as medições de fase e cria para cada estação um arquivo de observação contendo, em arquivos separados, as coordenadas das estações e o valor da altura da antena. Nesta fase, é introduzida a máscara de elevação;
- c) WAFSLP: procura e detecta perdas de ciclo nas observações;
- d) WAUPDT: detecta e exclui as perdas de ciclo detectadas;
- e) WAMUL1: realiza a detecção e localização do multicaminho nas informações de fase, gerando um diagrama de multicaminho para cada estação em formato gráfico ou vetorial; e
- f) MAPMERGE: realiza a junção de resultados de diferentes dias de uma determinada estação.

O algoritmo emprega como sinais de referência os sinais de satélites provindos de ângulos de elevação superiores a  $50^\circ$  sob a hipótese que os sinais acima desta elevação apresentam pouca ou nenhuma influência do multicaminho (seção 2.1.4.3). O campo analisado abrange uma varredura radial de 0 a  $360^\circ$  de azimuth em ângulos de elevação de 0 a  $50^\circ$ . Os ângulos de azimuth e elevação dos sinais refletidos referem-se ao ângulo de incidência do sinal direto e não à direção dos sinais advindos de possíveis refletores. Para antenas de estações de referência, os refletores se encontram, normalmente, na direção de um satélite afetado, contudo abaixo do horizonte da antena. (seção 2.1.4.2)

A detecção e a localização da ocorrência são representadas conforme o ângulo de incidência dos sinais, i.e., em um sistema de coordenadas com resolução de  $2^\circ$  em elevação por  $10^\circ$  em azimuth. Assim, para cada estação incluída na rede é gerado um mapa do efeito de multicaminho, como exemplifica a figura 39.

FIGURA 39—MAPA DO EFEITO DE MULTICAMINHO NA ESTAÇÃO



Os resultados são interpretados por meio da intensidade da influência de multicaminho nas dupla-diferenças de fase (seção 2.1.4), representada por símbolos gráficos descritos no quadro 10.

QUADRO 10 – INTENSIDADE DO EFEITO DE MULTICAMINHO

Símbolo	Significado	RMS
espaço vazio	Dados não-disponíveis	-
ponto	Influência baixa	< 5 mm
■	Influência média	< 15 mm
■	Influência alta	> 15 mm

Fonte: WANNINGER (2003a).

As influências do efeito de multicaminho nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$ , da ordem de milímetros, têm contribuição significativa na maioria das aplicações GPS (seção 2.1.4.2). WANNINGER e MAY (2000, p. 133) mostram que com o aumento da linha de base as influências ionosféricas se tornam significativas a ponto de dificultar a identificação dos efeitos de multicaminho nas observações. Por esta razão, o algoritmo empregado recorre à combinação linear livre da ionosfera, sendo necessárias observações de dupla frequência. Nas seções 4.3.4 e 5.4.1 encontram-se as aplicações do programa, incluindo detalhes operacionais.

#### 3.2.3.4 Outros programas de processamento e análise de dados

a) TEQC (ingl. *Translate Edit Quality Check*) – desenvolvido pela UNAVCO (*University NAVSTAR Consortium*), o programa oferece diversas aplicações destinadas à conversão, edição e verificação de qualidade de dados de observação GPS, GLONASS e SBAS (ingl. *Satellite Based Augmentation System*) (UNAVCO, 2006).

Uma das aplicações do programa refere-se à conversão de arquivos binários provenientes de receptores de diferentes fabricantes para o formato RINEX. Os comandos são dados por opções, escritas diretamente na janela do sistema operacional (MS-DOS) ou executados via processamento de arquivos em lote. Neste trabalho, o TEQC foi empregado para a conversão de arquivos binários para o formato RINEX.

b) MATLAB 6.5 (ingl. *MATrix LABoratory*) – programa de uso específico, aperfeiçoado para executar cálculos científicos e de engenharia. Originalmente, era um programa para operações matemáticas sobre matrizes mas transformou-se em um sistema computacional flexível para a solução de problemas técnicos (CHAPMAN,

2003). O programa implementa a linguagem MATLAB e oferece ampla biblioteca de funções predefinidas para facilitar a programação.

c) GPSurvey 2.35 – programa de pós-processamento de dados de observações GPS desenvolvido pela firma Trimble. O programa possibilita a determinação de coordenadas geodésicas em levantamentos estáticos e cinemáticos, com a vantagem de disponibilizar um editor de antenas, por meio do qual se pode criar um banco de dados que relaciona as informações das antenas envolvidas em um levantamento, incluindo dados de correção do centro de fase.

d) WaRINEX-Standard – permite a edição e manipulação de observações GPS a partir dos arquivos no formato RINEX. Dentre as operações possíveis, citam-se a junção de arquivos de observação e navegação e a decomposição dos dados de observação em novos arquivos conforme diferentes critérios.

e) CCANT – programa para o manuseio de correções do centro de fase de antenas GNSS. Com este programa, é possível converter arquivos entre os formatos ANTEX, NGS, antigo IGS e Geo++ bem como realizar a conversão entre níveis de calibração (seção 2.3.5). Outra tarefa é a conversão dos resultados de calibrações individuais para valores de PCO de referência. Esta prática permite a comparação entre resultados provindos de calibrações distintas.

### 3.3 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO

Nesta seção, descrevem-se os procedimentos de calibração de antenas GPS em duas principais etapas: os levantamentos de campo e o pós-processamento dos dados. Para a descrição desses procedimentos, tomaram-se como exemplo as medições realizadas nos pilares HPF2 e NPF2 no dia GPS 320 (GPS 1297-1).

#### 3.3.1 Levantamentos de Campo

Conforme exposto, diversos levantamentos de campo foram conduzidos nos pilares geodésicos do terraço de medições do GIK (figura 25). As medições foram realizadas pelo método relativo com rotações automáticas na antena realizadas pelo

dispositivo DRB (seção 3.2.2). Empregaram-se os dados da estação de referência KARL (seção 3.3.1.1) para a realização dos processamentos relativos. O quadro 11 exibe um panorama das medições, incluindo informações como a hora de início e término dos levantamentos, os pilares usados e a identificação das antenas e receptores.

## QUADRO 11 – PANORAMA DAS CALIBRAÇÕES DE ANTENAS GPS REALIZADAS NO GIK

N.	Int. Nr.	Antena	SN	Medição					Propriet.	Receptor	SN	Propriet.
				início	Dia GPS	fim	Dia GPS	Pilar				
1	1	TRM22020.00+GP	9556	15.11.2004, 11:19	320	16.11.2004, 22:56	321	HPF2	GIK	4000SSi	13214	GIK
2	2	LEIAT502	1334	15.11.2004, 11:17	320	16.11.2004, 11:33	321	NPF2	GIK	SR530	31075	GIK
3	2	LEIAT502	1334	16.11.2004, 12:45	321	17.11.2004, 12:58	322	HPF2	GIK	SR530	31075	GIK
4	1	TRM22020.00+GP	9556	16.11.2004, 12:41	321	17.11.2004, 12:47	322	NPF2	GIK	4000SSi	13214	GIK
5	3	LEIAT502	2776	17.11.2004, 14:00	322	18.11.2004, 14:18	323	HPF2	LV-RP	SR530	31075	GIK
6	4	LEIAT502	2819	17.11.2004, 14:03	322	18.11.2004, 14:17	323	NPF2	LV-RP	SR530	31236	GIK
7	4	LEIAT502	2819	18.11.2004, 14:54	323	19.11.2004, 14:28	324	HPF2	LV-RP	SR530	31075	GIK
8	3	LEIAT502	2776	18.11.2004, 14:54	323	19.11.2004, 14:28	324	NPF2	LV-RP	SR530	31236	GIK
9	5	LEIAT502	8286	22.11.2004, 09:32	327	23.11.2004, 09:47	328	HPF2	LV-RP	SR530	31075	GIK
10	6	LEIAT502	2709	22.11.2004, 09:34	327	23.11.2004, 09:47	328	NPF2	LV-RP	SR530	31236	GIK
11	6	LEIAT502	2709	23.11.2004, 09:57	328	24.11.2004, 10:19	329	HPF2	LV-RP	SR530	31075	GIK
12	5	LEIAT502	8286	23.11.2004, 09:57	328	24.11.2004, 10:19	329	NPF2	LV-RP	SR530	31236	GIK
13	7	LEIAX1202	0196	24.11.2004, 10:34	329	25.11.2004, 10:50	330	HPF2	LV-RP	SR530	31075	GIK
14	8	LEIAT502	1325	24.11.2004, 10:35	329	25.11.2004, 10:50	330	NPF2	GIK	SR530	31236	GIK
15	8	LEIAT502	1325	25.11.2004, 10:59	330	26.11.2004, 17:10	331	HPF2	GIK	SR530	31075	GIK
16	7	LEIAX1202	0196	25.11.2004, 10:59	330	26.11.2004, 17:11	331	NPF2	LV-RP	SR530	31236	GIK
17	9	LEIAT502	1954	30.11.2004, 09:26	335	01.12.2004, 09:47	336	HPF2	IAGB	SR530	31075	GIK
18	10	LEIAT502	1960	30.11.2004, 09:27	335	01.12.2004, 09:48	336	NPF2	IAGB	SR530	31236	GIK
19	11	LEIAT502	3614	01.12.2004, 10:00	336	02.12.2004, 10:13	337	HPF2	GIUS	SR530	31075	GIK
20	12	LEIAT502	3520	01.12.2004, 09:59	336	02.12.2004, 10:13	337	NPF2	GIUS	SR530	31236	GIK
21	9	LEIAT502	1954	02.12.2004, 10:22	337	03.12.2004, 10:35	338	HPF2	IAGB	SR530	31075	GIK
22	10	LEIAT502	1960	02.12.2004, 10:22	337	03.12.2004, 10:35	338	NPF2	IAGB	SR530	31236	GIK
23	13	LEIAT502	1334	07.12.2004, 09:26	342	08.12.2004, 09:39	343	HPF2	GIK	SR530	31075	GIK
24	8	LEIAT502	1325	07.12.2004, 09:27	342	08.12.2004, 09:39	343	NPF2	GIK	SR530	31236	GIK
25	8	LEIAT502	1325	08.12.2004, 09:52	343	09.12.2004, 09:52	344	HPF2	GIK	SR530	31075	GIK
26	13	LEIAT502	1334	08.12.2004, 09:52	343	09.12.2004, 09:52	344	NPF2	GIK	SR530	31236	GIK
27	13	LEIAT502	1334	13.12.2004, 10:41	348	14.12.2004, 10:52	349	HPF2	GIK	SR530	31075	GIK
28	8	LEIAT502	1325	13.12.2004, 10:42	348	14.12.2004, 10:52	349	NPF2	GIK	SR530	31236	GIK
29	8	LEIAT502	1325	14.12.2004, 11:05	349	15.12.2004, 11:22	350	HPF2	GIK	SR530	31075	GIK
30	13	LEIAT502	1334	14.12.2004, 11:20	349	15.12.2004, 11:22	350	NPF2	GIK	SR530	31236	GIK
31	14	TRM22020.00+GP	9555	11.01.2005, 11:55	11	12.01.2005, 12:40	12	HPF2	GIK	4000SSi	13196	GIK
32	15	TRM22020.00+GP	8918	11.01.2005, 11:55	11	12.01.2005, 12:40	12	NPF2	GIK	4000SSi	13214	GIK
33	15	TRM22020.00+GP	8918	13.01.2005, 10:50	13	14.01.2005, 11:15	14	HPF2	GIK	4000SSi	13196	GIK
34	14	TRM22020.00+GP	9555	13.01.2005, 10:50	13	14.01.2005, 11:15	14	NPF2	GIK	4000SSi	13214	GIK
35	15	TRM22020.00+GP	8918	14.01.2005, 15:55	14	15.01.2005, 16:45	15	HPF2	GIK	4000SSi	13196	GIK
36	14	TRM22020.00+GP	9555	14.01.2005, 15:55	14	15.01.2005, 16:45	15	NPF2	GIK	4000SSi	13214	GIK
37	14	TRM22020.00+GP	9555	15.01.2005, 18:55	15	16.01.2005, 19:00	16	HPF2	GIK	4000SSi	13196	GIK
38	15	TRM22020.00+GP	8918	15.01.2005, 18:55	15	16.01.2005, 19:00	16	NPF2	GIK	4000SSi	13214	GIK
39	16	TRM5800	5278	17.01.2005, 18:25	17	18.01.2005, 19:15	18	HPF2	GIK	TRM 5800	15278	GIK
40	17	TRM29659.00 CR	7657	17.01.2005, 18:25	17	18.01.2005, 19:15	18	NPF2	GIK	4000SSi	13214	GIK
41	18	LEIAT502	7189	21.01.2005, 14:55	21	22.01.2005, 15:10	22	HPF2	Trenkle	SR530	31075	GIK
42	18	LEIAT502	7189	22.01.2005, 15:15	22	23.01.2005, 15:30	23	HPF2	Trenkle	SR530	31075	GIK
43	19	TRM22020.00+GP	8413	24.01.2005, 15:52	24	25.01.2005, 16:00	25	HPF2	LV-KA	4000SSi	13196	GIK
44	20	TRM22020.00+GP	6926	24.01.2005, 15:52	24	25.01.2005, 16:00	25	NPF2	LV-KA	4000SSi	13214	GIK
45	20	TRM22020.00+GP	6926	26.01.2005, 08:44	26	27.01.2005, 09:00	27	HPF2	LV-KA	4000SSi	13196	GIK
46	19	TRM22020.00+GP	8413	26.01.2005, 08:44	26	27.01.2005, 09:00	27	NPF2	LV-KA	4000SSi	13214	GIK
47	21	LEIAT502	4138	27.01.2005, 09:30	27	28.01.2005, 09:54	28	HPF2	Trenkle	SR530	31075	GIK
48	22	TRM22020.00+GP	8692	27.01.2005, 09:30	27	28.01.2005, 09:54	28	NPF2	LV-KA	4000SSi	13196	GIK
49	22	TRM22020.00+GP	8692	28.01.2005, 10:15	28	29.01.2005, 10:35	29	HPF2	LV-KA	4000SSi	13196	GIK
50	21	LEIAT502	4138	28.01.2005, 10:15	28	29.01.2005, 10:35	29	NPF2	Trenkle	SR530	31075	GIK
51	23	TRM22020.00+GP	5816	31.01.2005, 09:38	31	01.02.2005, 09:43	32	HPF2	LV-KA	4000SSi	13196	GIK
52	24	TRM22020.00+GP	7000	31.01.2005, 09:38	31	01.02.2005, 09:43	32	NPF2	LV-KA	4000SSi	13214	GIK
53	24	TRM22020.00+GP	7000	01.02.2005, 17:09	32	02.02.2005, 17:27	33	HPF2	LV-KA	4000SSi	13196	GIK
54	23	TRM22020.00+GP	5816	01.02.2005, 17:09	32	02.02.2005, 17:27	33	NPF2	LV-KA	4000SSi	13214	GIK
55	25	TRM22020.00+GP	5817	02.02.2005, 18:59	33	03.02.2005, 19:21	34	HPF2	LV-KA	4000SSi	13196	GIK
56	24	TRM22020.00+GP	7000	02.02.2005, 18:59	33	03.02.2005, 19:21	34	NPF2	LV-KA	4000SSi	13214	GIK
57	24	TRM22020.00+GP	7000	03.02.2005, 20:28	34	04.02.2005, 21:35	35	HPF2	LV-KA	4000SSi	13196	GIK
58	25	TRM22020.00+GP	5817	03.02.2005, 20:28	34	04.02.2005, 21:30	35	NPF2	LV-KA	4000SSi	13214	GIK
59	17	TRM29659.00 CR	7657	07.02.2005, 10:57	38	08.02.2005, 11:07	39	HPF1	GIK	4000SSi	13214	GIK
60	26	TRM4800	4859	07.02.2005, 10:57	38	08.02.2005, 11:07	39	NPF1	GIK	TRM 4800	124859	GIK
61	17	TRM29659.00 CR	7657	08.02.2005, 12:40	39	09.02.2005, 12:48	40	HPF1	GIK	4000SSi	A13214	GIK
62	26	TRM4800	4859	08.02.2005, 12:40	39	09.02.2005, 12:48	40	NPF1	GIK	TRM 4800	124859	GIK
63	17	TRM29659.00 CR	7657	09.02.2005, 13:14	40	10.02.2005, 13:21	41	HPF1	GIK	4000SSi	A13214	GIK
64	26	TRM4800	4859	09.02.2005, 13:14	40	10.02.2005, 13:22	41	NPF1	GIK	TRM 4800	124859	GIK
65	26	TRM29659.00 CR	4859	10.02.2005, 13:55	41	11.02.2005, 14:07	42	HPF1	GIK	TRM 4800	124859	GIK
66	17	TRM29659.00 CR	7657	10.02.2005, 13:57	41	11.02.2005, 14:07	42	NPF1	GIK	4000SSi	A13214	GIK
67	26	TRM4800	4859	11.02.2005, 14:35	42	12.02.2005, 16:20	43	HPF1	GIK	TRM 4800	124859	GIK
68	17	TRM29659.00 CR	7657	11.02.2005, 14:35	42	12.02.2005, 16:20	43	NPF1	GIK	4000SSi	A13214	GIK
69	26	TRM4800	4859	12.02.2005, 17:30	43	13.02.2005, 17:33	44	HPF1	GIK	TRM 4800	124859	GIK
70	17	TRM29659.00 CR	7657	12.02.2005, 17:30	43	13.02.2005, 17:20	44	NPF1	GIK	4000SSi	A13214	GIK
71	26	TRM4800	4859	13.02.2005, 17:45	44	14.02.2005, 18:04	45	HPF1	GIK	TRM 4800	124859	GIK
72	17	TRM29659.00 CR	7657	13.02.2005, 17:45	44	14.02.2005, 18:04	45	NPF1	GIK	4000SSi	A13214	GIK

LV-RP - Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz;  
GIK - Geodätisches Institut Karlsruhe;

IAGB - Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen (Stuttgart);  
GIUS - Geodätisches Institut der Universität Stuttgart;

### 3.3.1.1 Estação de referência KARL

A estação de referência permanente KARL (figura 25) é operada pelo Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (GIK) em cooperação com o Departamento Federal de Cartografia e Geodésia (al. *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie – BKG*) desde fevereiro de 1997. Ela integra o serviço de posicionamento alemão SAPOS (al. *Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung*) e as redes GREF (al. *geodätisches Referenznetz*), EUREF (al. *European Reference Frame*) e, a partir do ano 2000, o ITRF.

A estação KARL consiste basicamente de um receptor Trimble 4000SSI<sup>21</sup> (figura 28), uma antena AOAD/M\_T *choke ring* (figura 27) e um computador de controle. Os arquivos de observação desta estação podem ser obtidos de forma rápida e prática por meio da transferência de dados via Internet. O acesso ao sistema é restrito a usuários cadastrados, que podem obter os dados conforme o dia GPS e a taxa de gravação requeridos. A figura 40 ilustra a antena AOAD/M\_T *choke ring* da estação KARL. Na figura 25 (p. 63) se observa a localização desta estação em relação aos demais pilares existentes no terraço de medições do GIK.

FIGURA 40–ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA KARL



Os dados de observação da estação KARL foram empregados para todas as tarefas de pós-processamento executadas neste trabalho.

---

<sup>21</sup> até 8 de fevereiro de 2006.



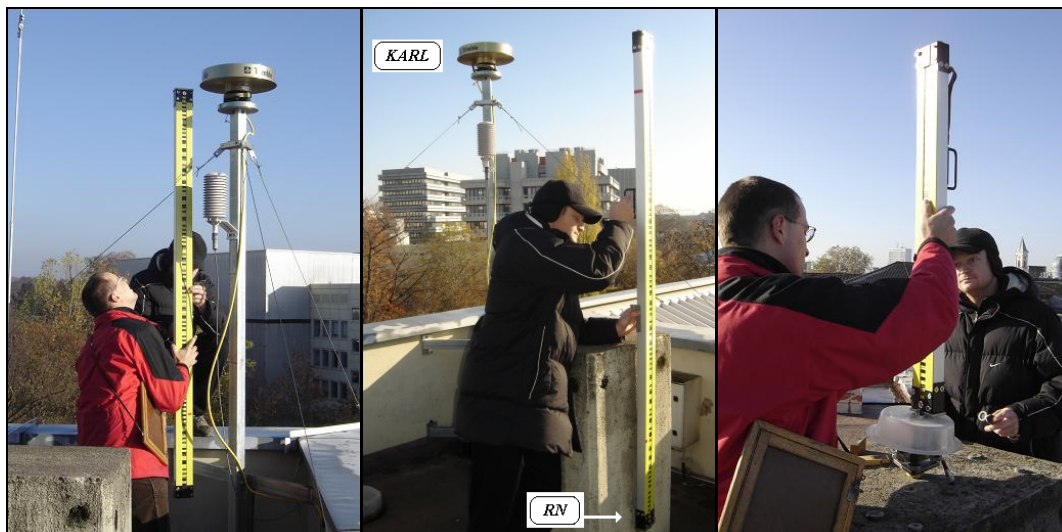


nivelamento, que inicia pela leitura da altura do ARP da antena KARL, na seqüência a leitura da referência de nível e por fim a leitura nos pilares de calibração.

FIGURA 42–NÍVEL ZEISS DINI 10



FIGURA 43–DETERMINAÇÃO DAS DIFERENÇAS DE NÍVEL



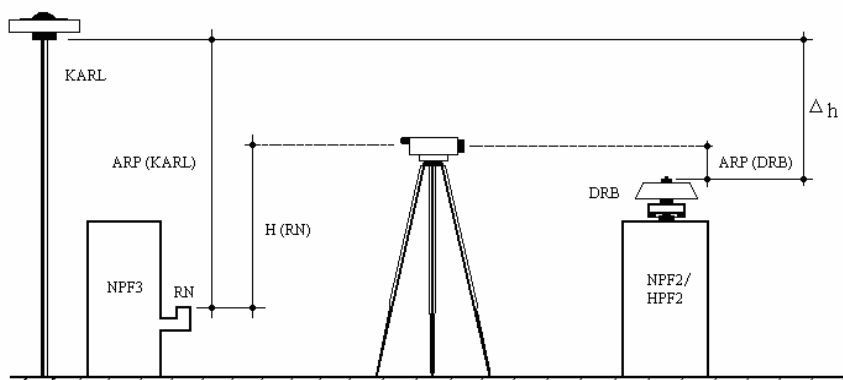
A figura 44 ilustra o nivelamento das estações, onde o termo  $\Delta_h$  representa a diferença de altura entre o ARP da antena da estação KARL e o ARP do mecanismo DRB instalado no pilar de calibração. Da figura 44, tem-se:

$$\begin{aligned} ARP_{KARL} - H_{RN} &= \Delta_h - ARP_{DRB} \\ \Delta_h &= ARP_{KARL} - H_{RN} + ARP_{DRB} \end{aligned} \quad (3.1)$$

O nivelamento foi executado antes do início e depois do término de operação das medições e sempre que os mecanismos DRB eram reinstalados nos pilares. Uma

vez determinadas as diferenças de nível, as antenas eram fixadas nos dispositivos DRB e então iniciadas as medições GPS, descritas na seção 3.3.1.3.

FIGURA 44–NIVELAMENTO GEOMÉTRICO



### 3.3.1.3 Medições GPS

Conforme exposto, serão apresentados na seqüência os procedimentos visando a calibração das antenas GPS. Foram efetuadas diversas calibrações relativas (quadro 11), contudo este relato se restringe às calibrações das antenas do modelo TRM22020.00+GP e LEIAT502, instaladas nos pilares HPF2 e NPF2, respectivamente (figura 45).

As antenas foram orientadas para o azimuth inicial (por convenção, o norte é a direção de partida das medições). O programa AAKDD foi configurado para controlar a operação de dois dispositivos DRB com taxa de gravação de dados de 15 segundos, permitindo observações com a antena orientada nos sentidos norte, sul, leste e oeste no período de um minuto completo (seção 3.2.3.1). No quadro 12 estão indicadas as épocas e as correspondentes seqüências de orientação azimuthal da antena no intervalo de 1 minuto, que é o tempo necessário para que o movimento realizado pelo mecanismo volte a se repetir.

Uma consideração importante diz respeito ao travamento do sistema em virtude de um possível enrolamento dos cabos ao redor do suporte do mecanismo. Em tal caso, a monitoração remota da estação de calibração pode representar uma solução.

As imagens adquiridas por uma câmera de vídeo instalada no laboratório do observatório astronômico forneceram cenas dos pilares de calibração com intervalos de 5 minutos. Estas imagens foram disponibilizadas em tempo real via Internet ou intranet, possibilitando a monitoração parcial do movimento das antenas por meio de uma vista panorâmica dos pilares e da área de circulação.

QUADRO 12 – SEQUÊNCIA DE ORIENTAÇÃO AUTOMÁTICA DA ANTENA

PERÍODO	ÉPOCA DE GRAVAÇÃO NO RECEPTOR [s]	ORIENTAÇÃO	AZIMUTE [°]
1 minuto	0	Norte	0
	15	Sul	180
	30	Oeste	270
	45	Leste	90

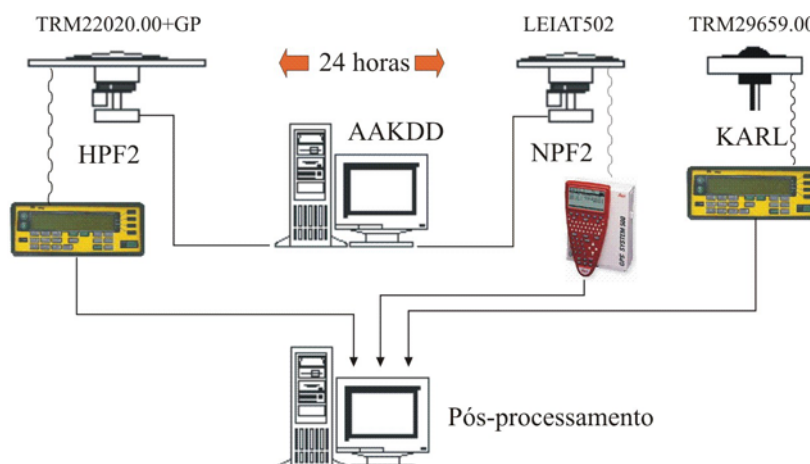
Fonte: WANNINGER (2004b).

FIGURA 45–DISPOSITIVOS DRB E PILARES DE CALIBRAÇÃO



Na figura 46 observam-se as etapas dos levantamentos de calibração relativa de antenas. Todas as seções de levantamento realizadas (quadro 11) foram conduzidas conforme estes procedimentos salvo quando era conduzida a calibração de uma única antena. No apêndice 2 apresenta-se um modelo de caderneta de campo utilizada para o registro das informações nos levantamentos realizados no GIK.

FIGURA 46–FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO



### 3.3.2 Processamento dos Dados

As observações GPS foram submetidas ao processamento com o programa Wasoft/Kalib (seção 3.2.3.2). A sequência do processo é apresentada no quadro 13, que exemplifica o processamento das observações adquiridas no pilar NPF2. O processo é similar ao exposto na seção 3.2.3.2.

Em uma primeira etapa, o programa efetuou, a partir dos dados originais, o teste de verificação das rotações do mecanismo DRB para averiguar se o equipamento funcionou corretamente durante o período de rastreo. Na etapa de preparação dos dados, os arquivos de observação no formato RINEX foram decompostos em quatro novos arquivos de acordo com as orientações azimutais. Esta decomposição foi executada com auxílio do programa WARINEX-Standard (seção 3.2.3.4), que separou os arquivos de observação nas correspondentes orientações norte (*n*), sul (*s*), leste (*l*) e oeste (*o*).



O primeiro processamento realizado pelo módulo WASOFT consistiu na determinação das coordenadas precisas do pilar de calibração. Estas coordenadas foram introduzidas no processamento das linhas de base na segunda execução do módulo WASOFT. Nesta fase, foram resolvidas as ambigüidades das linhas de base.

Após a verificação das ambigüidades com o módulo WANET, foi realizada a determinação do PCO e das PCV dependentes de azimuth e elevação pelo módulo WAANT. Esta determinação foi cumprida em dois passos: a estimação do PCO, com máscara de elevação de 15°; e na sequência a determinação das PCV, com máscara de 5°. Em ambos os casos, a diferença de nível entre o ARP das antenas foi introduzida no processamento. As variações do centro de fase dependentes de elevação foram determinadas com a introdução da opção +E na linha de comando, enquanto a determinação completa do PCO e das PCV compreendeu, além das PCV dependente de elevação, também as PCV dependentes de azimuth (opção +AE).

Foram gerados os arquivos de calibração nos formatos ANTEX, NGS, Geo++ e vetorial de todas as antenas submetidas à calibração nos pilares do GIK. Os PCO foram convertidos para valores de referência a fim de que pudessem ser comparados entre si os diferentes conjuntos de correção. De outro modo, os valores das PCV eram lidos diretamente por rotinas do MATLAB a partir dos arquivos no formato ANTEX ou Geo++ a fim de gerar os diagramas de fase das antenas. Estes resultados são analisados no capítulo 4.

### 3.4 LEVANTAMENTOS PARA A ANÁLISE DA QUALIDADE DO SINAL

Em uma segunda etapa dos levantamentos, foram realizadas novas medições sem o propósito de calibração de antenas GPS, mas com o objetivo de investigar as influências da alteração do entorno da antena na qualidade do sinal.

Visando realizar análises baseadas no efeito de multicaminho dos sinais e nos valores da SNR fornecidos pelos receptores GPS, o presente método consistiu em

rastrear a constelação GPS em períodos de 24 horas, modificando o cenário<sup>23</sup> da estação de rastreo a cada nova medição. Assim, foram formadas todas as possíveis combinações de antenas, receptores e cabos (antena-receptor) de diferentes comprimentos, de forma que ao menos um elemento do entorno da estação era modificado. Essa alteração foi caracterizada também pela mudança do local de calibração, efetuada mediante o intercâmbio da antena entre pilares. A utilização de dois tipos de adaptadores também promoveram alteração do entorno, proporcionando diferentes alturas do ARP das antenas à superfície do pilar.

QUADRO 14 – PANORAMA DOS LEVANTAMENTOS PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DO SINAL GPS

N.	Int. Nr.	Antena	SN	Medição					Receptor	SN	Adapt.	Cabo	MARF
				início	Dia	fim	Dia	Pilar					
73	1	TRM22020.00+GP	8918	11.07.2005, 07:30	192	12.07.2005, 07:30	193	HPF1	4000SSi	1439	curto	longo	-
74	2	TRM22020.00+GP	8918	12.07.2005, 08:10	193	13.07.2005	194	HPF1	4000SSi	1439	longo	longo	-
75	3	TRM22020.00+GP	8918	13.07.2005, 14:42	193	14.07.2005, 14:52	194	HPF2	4000SSi	1439	longo	longo	-
76	4	TRM22020.00+GP	9555	14.07.2005, 18:33	195	15.07.2005, 18:40	196	HPF1	4000SSi	1439	curto	longo	-
77	5	TRM22020.00+GP	8918	14.07.2005, 18:33	195	15.07.2005, 18:40	196	HPF2	4000SSi	7636	longo	curto	-
78	6	TRM22020.00+GP	9555	16.07.2005, 09:57	197	17.07.2005	198	HPF1	4000SSi	1439	longo	longo	-
79	7	TRM22020.00+GP	8918	16.07.2005, 09:57	197	17.07.2005	198	HPF2	4000SSi	7636	curto	longo	-
80	8	TRM22020.00+GP	9555	17.07.2005, 12:48	198	18.07.2005, 12:55	199	HPF1	4000SSi	1439	longo	longo	-
81	9	TRM22020.00+GP	8918	17.07.2005, 12:48	198	18.07.2005, 12:55	199	HPF2	4000SSi	7636	curto	curto	-
82	10	TRM22020.00+GP	8918	18.07.2005, 16:33	199	19.07.2005, 16:50	200	HPF1	4000SSi	1439	longo	curto	-
83	11	TRM22020.00+GP	9555	18.07.2005, 16:35	199	19.07.2005, 16:49	200	HPF2	4000SSi	7636	curto	longo	-
84	12	TRM22020.00+GP	8918	19.07.2005, 19:50	200	20.07.2005	201	HPF1	4000SSi	1439	curto	curto	-
85	13	TRM22020.00+GP	9555	19.07.2005, 19:50	200	20.07.2005	201	HPF2	4000SSi	7636	longo	curto	-
86	14	TRM22020.00+GP	9555	21.07.2005, 11:00	202	22.07.2005, 11:15	203	HPF1	4000SSi	1439	curto	longo	-
87	15	TRM22020.00+GP	8918	21.07.2005, 11:00	202	22.07.2005, 11:15	203	NPF2	4000SSi	7636	longo	longo	-
88	16	TRM22020.00+GP	9555	23.07.2005, 10:50	204	24.07.2005, 13:50	205	HPF2	4000SSi	7636	curto	curto	-
89	17	TRM22020.00+GP	8918	23.07.2005, 10:50	204	24.07.2005, 13:50	205	NPF2	4000SSi	1439	longo	longo	-
90	18	TRM22020.00+GP	8918	24.07.2005, 16:15	205	25.07.2005	206	NPF2	4000SSi	1439	curto	longo	-
91	19	TRM22020.00+GP	8918	24.07.2005, 16:15	205	25.07.2005	206	HPF2	4000SSi	7636	longo	curto	-
92	1	TRM22020.00+GP	8918	26.07.2005, 15:46	207	27.07.2005, 15:38	208	HPF2	4000SSi	1439	curto	longo	-
93	2	TRM22020.00+GP	9555	26.07.2005, 15:46	207	27.07.2005, 15:38	208	NPF2	4000SSi	7636	curto	longo	-
94	3	TRM22020.00+GP	9555	27.07.2005, 17:17	208	28.07.2005, 17:25	209	HPF2	4000SSi	7636	curto	longo	-
95	4	TRM22020.00+GP	8918	27.07.2005, 17:17	208	28.07.2005, 17:25	209	NPF2	4000SSi	1439	curto	longo	-
96	5	TRM29659.00 CR	7657	28.07.2005, 17:38	209	29.07.2005, 18:00	210	HPF2	4000SSi	7636	base niv.	longo	-
97	6	TRM22020.00+GP	9555	28.07.2005, 17:38	209	29.07.2005, 18:00	210	NPF2	4000SSi	1439	base niv.	longo	-
98	7	TRM22020.00+GP	9555	18.08.2005, 12:57	230	19.08.2005	231	NPF2	4000SSi	1439	base niv.	longo	pilar
99	8	TRM22020.00+GP	9555	23.08.2005, 07:35	235	24.08.2005, 07:50	236	NPF2	4000SSi	1439	base niv.	longo	sem
100	9	TRM22020.00+GP	9555	17.12.2005, 12:32	351	17.12.2005, 14:01	351	NPF2	4000SSi	1439	base niv.	longo	sem
101	10	TRM22020.00+GP	9555	17.12.2005, 14:22	351	17.12.2005, 15:31	351	NPF2	4000SSi	1439	base niv.	longo	1 ant
102	11	TRM22020.00+GP	9555	17.12.2005, 15:54	351	17.12.2005, 16:50	351	NPF2	4000SSi	1439	base niv.	longo	2 ant

SN: número de série

MARF: Material absorvente de rádio frequência.

Receptores SN1439 e SN7636: BKG

<sup>23</sup> Cenário: é o conjunto de elementos físicos (tais como adaptadores e plano de terra, localização e tipo do pilar) e eletrônicos (receptores e cabos) que compõem o espaço onde se localiza a antena GPS receptora e que assim caracterizam a configuração do entorno da estação.

O quadro 14 mostra um resumo dos levantamentos realizados com vistas à análise da qualidade do sinal GPS. Nele estão indicados o número de série das antenas, os pilares ocupados e as configurações elaboradas, entre outras informações. A ordem seqüencial das medições indicada no quadro 14 inicia na medição nº 73 para manter continuidade à numeração iniciada no quadro 11. Os procedimentos das análises, os algoritmos empregados e os resultados são apresentados nas seções 4.3.4 e 4.3.5.



## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE KARLSRUHE

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises das calibrações conduzidas nos pilares geodésicos do observatório astronômico do Instituto de Geodésia de Karlsruhe. Antenas de diferentes fabricantes e modelos foram calibradas conforme os procedimentos expostos na seção 3.3.1 (quadro 11). As correções do centro de fase das antenas testadas foram derivadas por método relativo a partir de correções absolutas (GEO++) da antena de referência KARL (seção 3.3.1.1).

As investigações foram conduzidas com base nas informações dos arquivos no formato proprietário Geo++ (seção 3.2.3.2), o qual proporciona valores de PCO e PCV sem arredondamento. Por este motivo, este formato se tornou interessante para o emprego nestas análises. Um exemplo do conteúdo deste arquivo encontra-se no apêndice 3.

Na seção 4.1, são expostas algumas análises introdutórias das calibrações realizadas com antenas de mesma marca (grupos) a fim de avaliar o comportamento individual de cada instrumento. As comparações entre os valores de calibração deduzidos pelo método relativo a partir de correções absolutas da antena de referência KARL são expostos na seção 4.2. Nela, incluem-se comparações entre os níveis de calibração relativo e absoluto. Na seção 4.3 são analisadas as diversas influências do entorno da estação de rastreamento no diagrama de fase das antenas GPS.

### 4.1 ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO INDIVIDUAL DE ANTENAS GPS

É comprovada a ocorrência de oscilações do centro de fase das antenas GPS em virtude de diferenças construtivas. Estas são atribuídas, por exemplo, a eventuais irregularidades de fabricação ou mesmo deslocamentos durante a montagem do elemento receptor no invólucro do instrumento. Outrossim, a construção da antena como um todo, i.e., sua realidade eletrônica (tipo e construção dos elementos de recepção) e mecânica (material constituinte, forma e tamanho do invólucro, presença de plano de terra e radome) influenciam as características de recepção. Por esta razão,

antenas geodésicas devem ser calibradas, e para tanto, devem ser tratadas de forma individual ao invés de utilizar somente valores médios de correção do centro de fase.

Nesta seção, serão analisadas as componentes do PCO, as PCV dependentes de elevação e as PCV dependentes de elevação e azimute. Estes resultados foram obtidos de calibrações relativas processadas a partir das correções absolutas da antena de referência KARL. Foram empregadas antenas dos fabricantes Leica e Trimble, as quais são analisadas sob seus aspectos individuais.

#### 4.1.1 Análise do PCO

Os resultados de calibração de sete antenas do modelo TRM22020.00 (quadro 11) foram tomados para a análise das componentes norte, leste e vertical do PCO, extraídas dos arquivos de correção e representados em gráficos com o auxílio de uma rotina do programa MATLAB. As antenas são identificadas conforme o número de série, acrescido pela letra H ou N referentes à ocupação no pilar HPF2 e NPF2, respectivamente. Uma linha tracejada delimita estes resultados para as portadoras  $L_1$  (figura 47) e  $L_2$  (figura 48).

Observa-se que cada antena possui PCO próprios, embora sejam elas de mesma marca e modelo. As componentes norte e leste variam entre 0,8 mm e 2,5 mm na portadora  $L_1$  (figura 47) e entre 0,5 mm e 2,7 mm na portadora  $L_2$  (figura 48). Na portadora  $L_2$ , a componente norte apresenta oscilações maiores que na portadora  $L_1$  provavelmente porque a energia transmitida naquela é menor (LANGLEY, 1998b). Em face da mudança da antena para outro pilar, surgiram diferenças que podem ter sido ocasionadas por fatores de influência, e.g., as condições de multicaminho no entorno.

Na figura 49 estão indicadas as componentes verticais do PCO nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$ , nas quais se observam variações de até 2,5 mm na portadora  $L_1$  e 2,0 mm na portadora  $L_2$ . Estas variações podem estar associadas à latitude geográfica (e.g., *north hole*, seção 2.3.3), à máscara de elevação ou ao programa de processamento utilizado, entre outros fatores de influência.

FIGURA 47—COMPONENTES NORTE E LESTE DO PCO NA PORTADORA L1

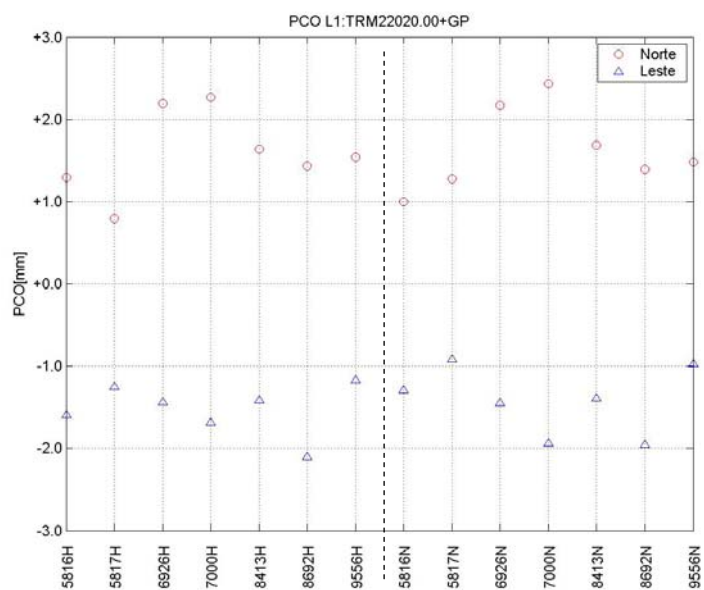


FIGURA 48—COMPONENTES NORTE E LESTE DO PCO NA PORTADORA L2

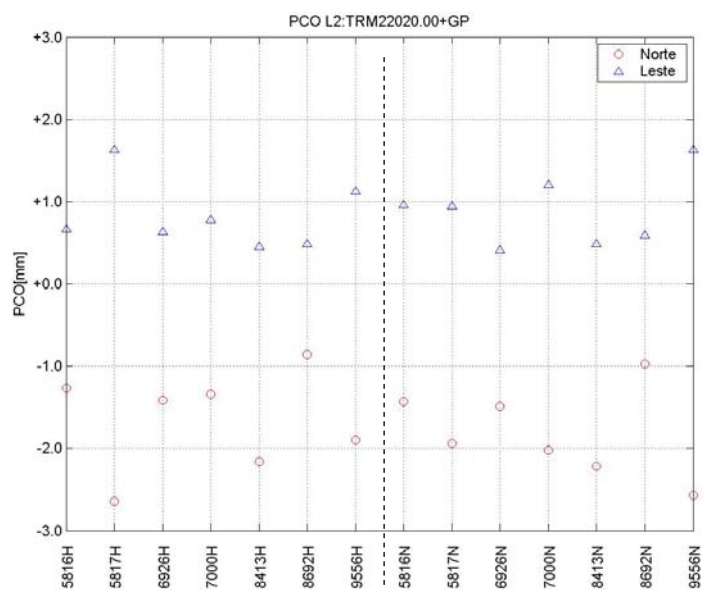
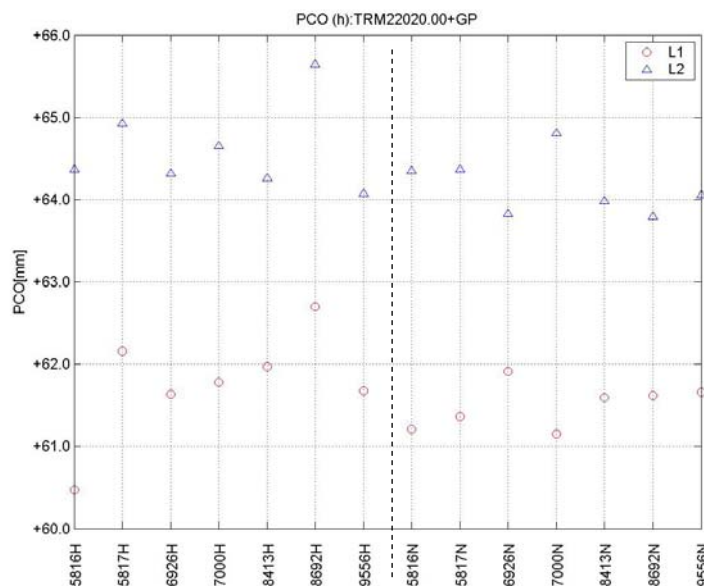


FIGURA 49–OFFSET VERTICAL NAS PORTADORAS L1 E L2



As correções do centro de fase são classificadas em dois tipos: o *offset* do centro de fase médio (PCO) e as variações do centro de fase associadas (PCV) (seção 2.2.4). Estas grandezas são dependentes entre si, e portanto, devem ser aplicadas em conjunto. Quando se trata de um conjunto de PCV distintas (ainda que as antenas sejam de mesmo modelo), para que possam ser comparadas entre si, devem ter os seus respectivos PCO reduzidos a um valor comum (WÜBBENA et al., 2000b, p. 2) (seção 2.2.4). Neste trabalho, adotaram-se como valores de referência os PCO de grupo prescritos pelo IGS/NGS para as antenas em questão (quadro 15). A redução dos PCO foi realizada com o auxílio do programa CCANT (seção 3.2.3.4).

QUADRO 15 – PCO DE REFERÊNCIA

ANTENA	FREQÜÊNCIA	PCO [mm]		
		NORTE	LESTE	VERTICAL
TRM22020.00	L1	-0,1	-0,6	74,2
	L2	-0,5	2,8	70,5
LEIAT502	L1	0,3	2,0	61,8
	L2	-1,4	1,8	65,4

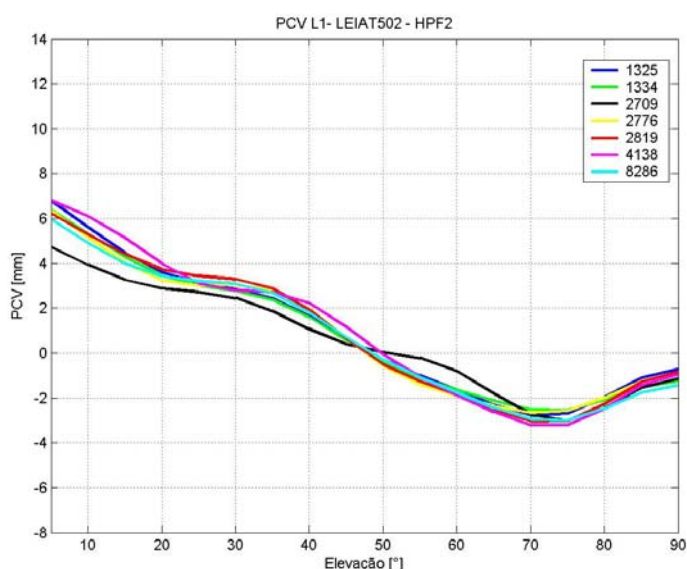
Fonte: NGS (2005).

#### 4.1.2 Análise das PCV Dependentes de Elevação

As PCV foram determinadas via método de calibração relativa a partir das correções absolutas (GEO++) da antena de referência KARL (seção 3.3.1.1). As PCV dependentes de elevação foram extraídas dos arquivos de correção a fim de gerar as visualizações e análises apresentadas na sequência. Observações acima de  $5^\circ$  de elevação do sinal dos satélites foram empregadas na obtenção destes dados em virtude dos efeitos sistemáticos sobre os sinais GPS incidentes próximo ao horizonte (seções 2.1.4.2 e 2.1.4.3) (GÖRRES et al., 2006, p. 139). Por conseguinte, são atribuídos zeros às PCV entre  $0^\circ$  e  $5^\circ$ , sendo analisados os valores acima de  $5^\circ$  de elevação (seção 3.3.2).

Os resultados das PCV de sete antenas LEIAT502 são apresentados na figura 50 (portadora  $L_1$ ), na figura 51 (portadora  $L_2$ ) e na figura 52 (combinação linear  $L_3$ ) para a calibração no pilar HPF2. Os diferentes traçados das curvas indicam que as antenas apresentam respostas eletrônicas distintas embora possuam características técnicas comuns.

FIGURA 50–PCV NA PORTADORA  $L_1$ , ANTENAS LEIAT502



Na frequência  $L_1$  observa-se que as PCV referentes a antena SN2709 se distinguem das demais curvas em ângulos de elevação de até  $70^\circ$ . Na frequência  $L_2$

este evento se observa para a antena SN4138 entre  $40^\circ$  e  $60^\circ$  de elevação, acumulando diferenças próximas a 2 mm. No diagrama das PCV da combinação linear  $L_3$  (figura 52), ocorrem diferenças mais significativas.

FIGURA 51–PCV NA PORTADORA L2, ANTENAS LEIAT502

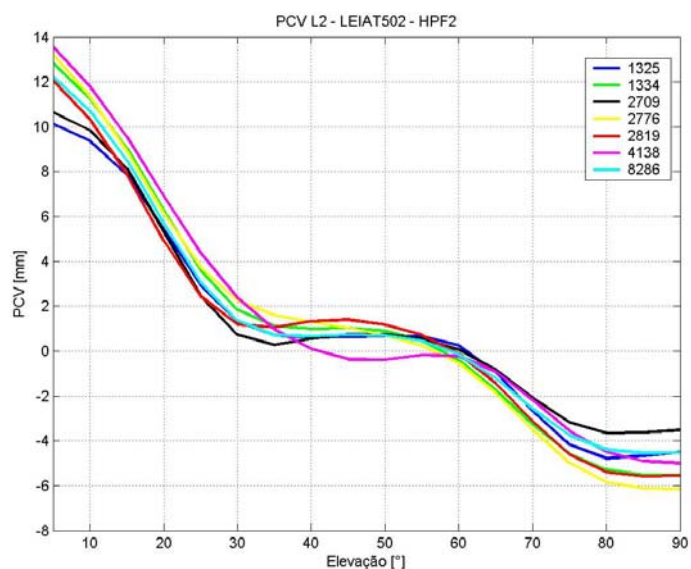
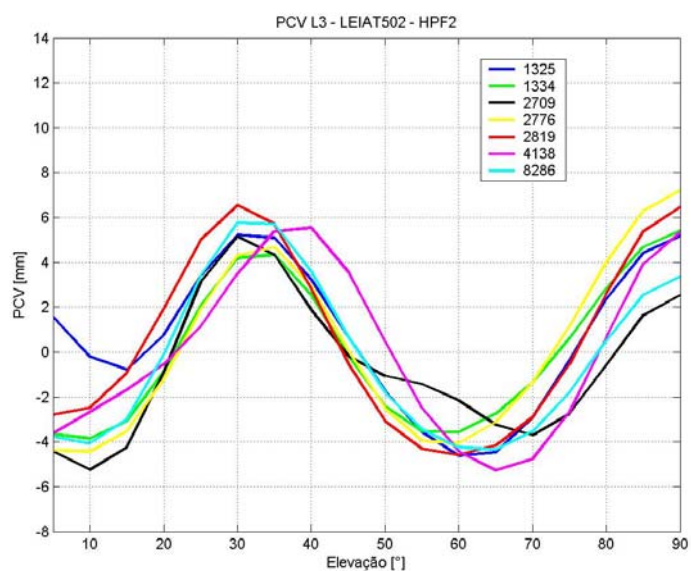
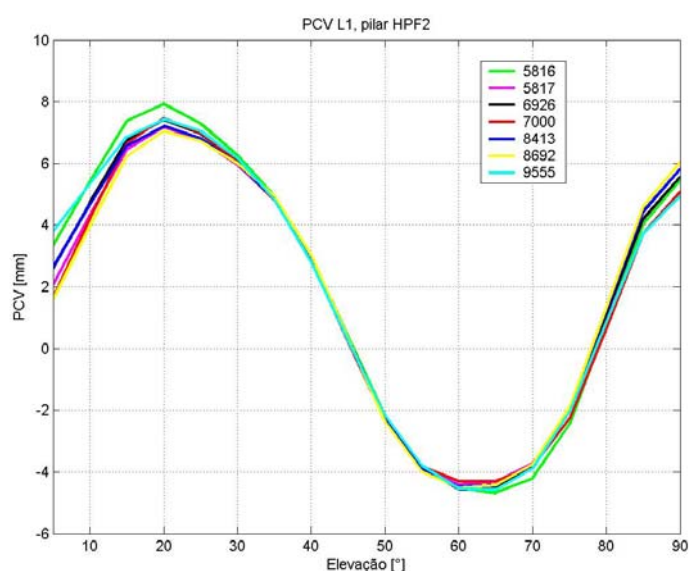


FIGURA 52–PCV NA COMBINAÇÃO LINEAR  $L_3$ , ANTENAS LEIAT502



A análise das PCV de sete antenas modelo TRM22020.00, representadas na figura 53 (portadora  $L_1$ ) e na figura 54 (portadora  $L_2$ ) para a calibração no pilar HPF2 e na figura 55 (portadora  $L_1$ ) e na figura 56 (portadora  $L_2$ ) para a calibração no pilar NPF2, assinala que o centro de fase dessas antenas assume comportamento similar em determinados intervalos de elevação e difere em outros intervalos em valores de até 1,5 mm.

FIGURA 53–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA  $L_1$ , ANTENAS TRM22020.00+GP, PILAR HPF2



Observa-se que na portadora  $L_1$  há correspondência das PCV de todas as antenas na faixa de  $35^\circ$  a  $55^\circ$  de elevação, enquanto na portadora  $L_2$  esta correspondência se verifica no intervalo de  $40^\circ$  a  $60^\circ$ .

FIGURA 54–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENAS  
TRM22020.00+GP, PILAR HPF2

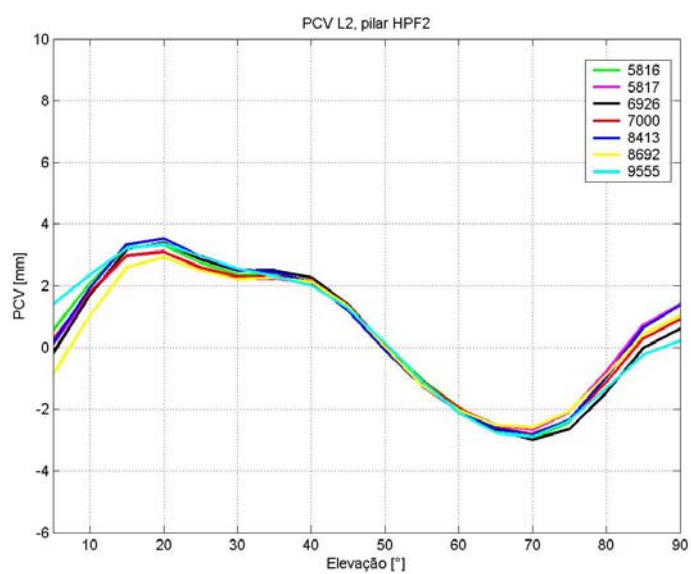


FIGURA 55–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENAS  
TRM22020.00+GP, PILAR NPF2

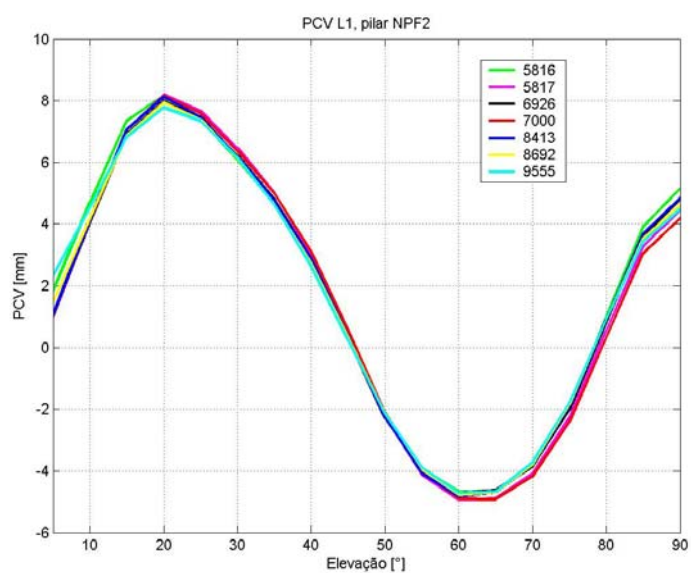
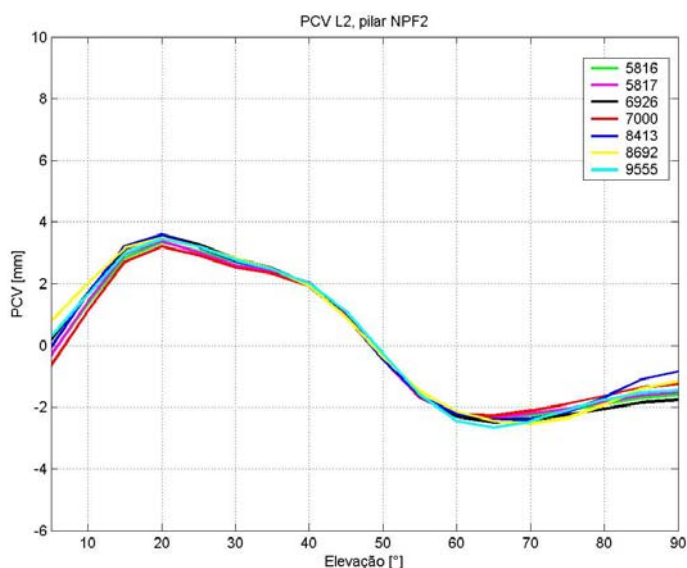




FIGURA 56–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENAS  
TRM22020.00+GP, PILAR NPF2



Diferenças máximas entre as curvas ocorrem em ângulos de elevação inferiores a  $30^\circ$  e superiores a  $70^\circ$ , em ambas as portadoras. Estas características podem indicar propriedades importantes como a homogeneidade e a estabilidade destes instrumentos. Contudo, antenas de mesmo modelo podem apresentar características de recepção distintas ainda que nelas esteja acoplado um plano de terra para a redução do efeito de multicaminho.

As PCV provenientes das calibrações nos pilares HPF2 e NPF2 foram reunidas na figura 57 (portadora  $L_1$ ) e na figura 58 (portadora  $L_2$ ). As linhas contínuas e as linhas interrompidas se relacionam aos pilares HPF2 e NPF2, respectivamente. Observa-se que as curvas tendem a se agrupar de acordo com o pilar de calibração, indicando que há uma correlação dos resultados com o pilar utilizado. Esta tendência é evidenciada na portadora  $L_2$  para as PCV em ângulos de elevação superiores a  $60^\circ$ , em que as curvas se afastam. Em tal caso, as diferenças alcançam até 3 mm, por exemplo para as antenas SN5816 e SN5817.

FIGURA 57–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENAS  
TRM22020.00+GP, PILARES HPF2 E NPF2

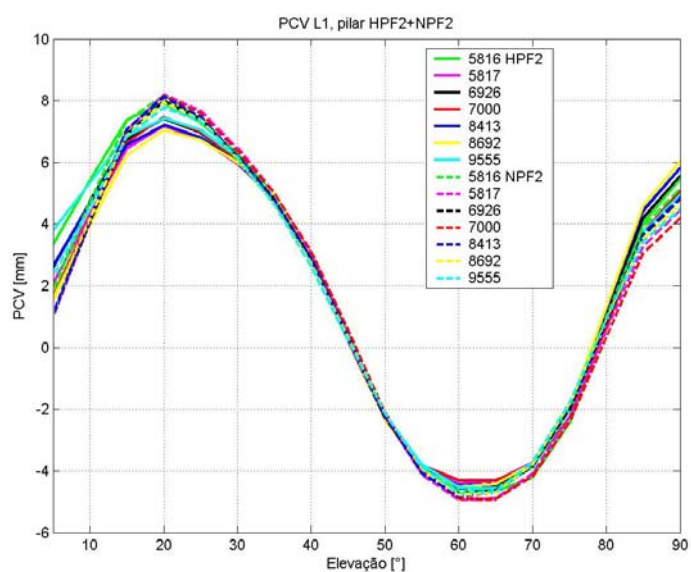
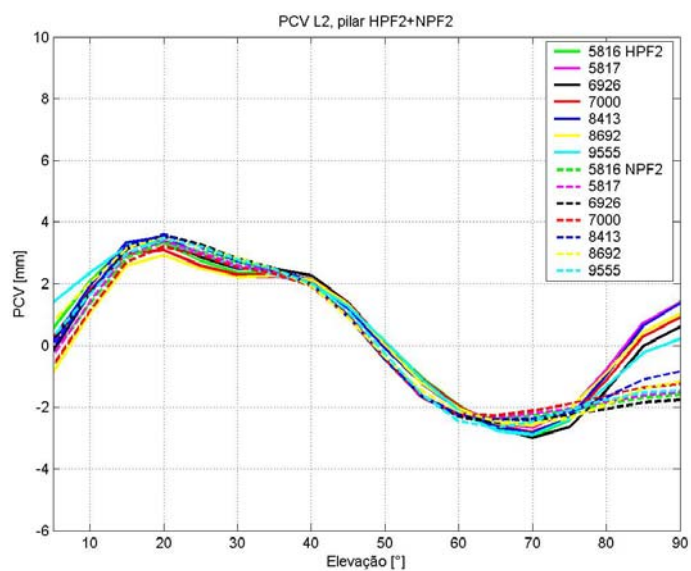


FIGURA 58–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENAS  
TRM22020.00+GP, PILARES HPF2 E NPF2

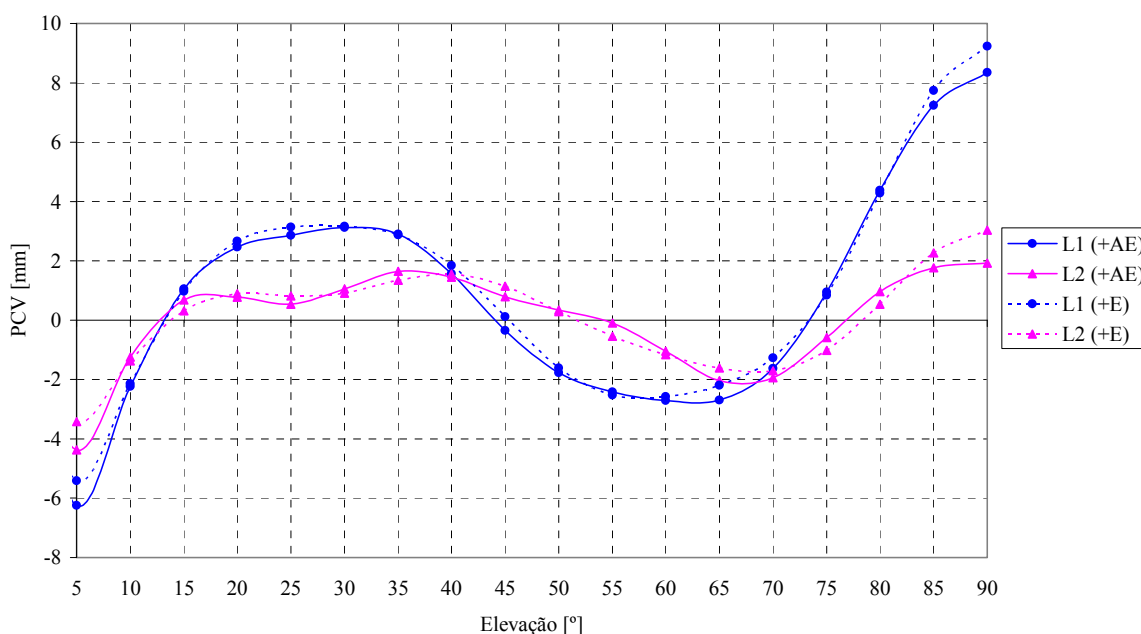


#### 4.1.3 Análise das PCV Dependentes de Elevação Considerando Azimute Médio

Fundamentalmente, as PCV podem ser ora modeladas em dependência de elevação, ora em dependência de azimute e elevação (seção 3.2.3.2). O programa Wasoft/Kalib oferece as opções  $+E$  (elevação) e  $+AE$  (azimute e elevação) para cumprir estas tarefas.

Foram analisadas as médias algébricas das PCV em valores azimutais discretos a fim de verificar se a média das correções em todos os azimutes ( $+AE$ ) correspondem às correções dependentes de elevação ( $+E$ ) estimada para a respectiva elevação. Os resultados de seis antenas TRM22020.00+GP serviram como objeto destas investigações. Na figura 59 são mostrados os resultados destas comparações nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$  para a antena SN5816.

FIGURA 59—ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS OPÇÕES PARA A DETERMINAÇÃO DAS PCV NAS PORTADORAS  $L_1$  E  $L_2$ , ANTENA TRM22020.00+GP SN5816

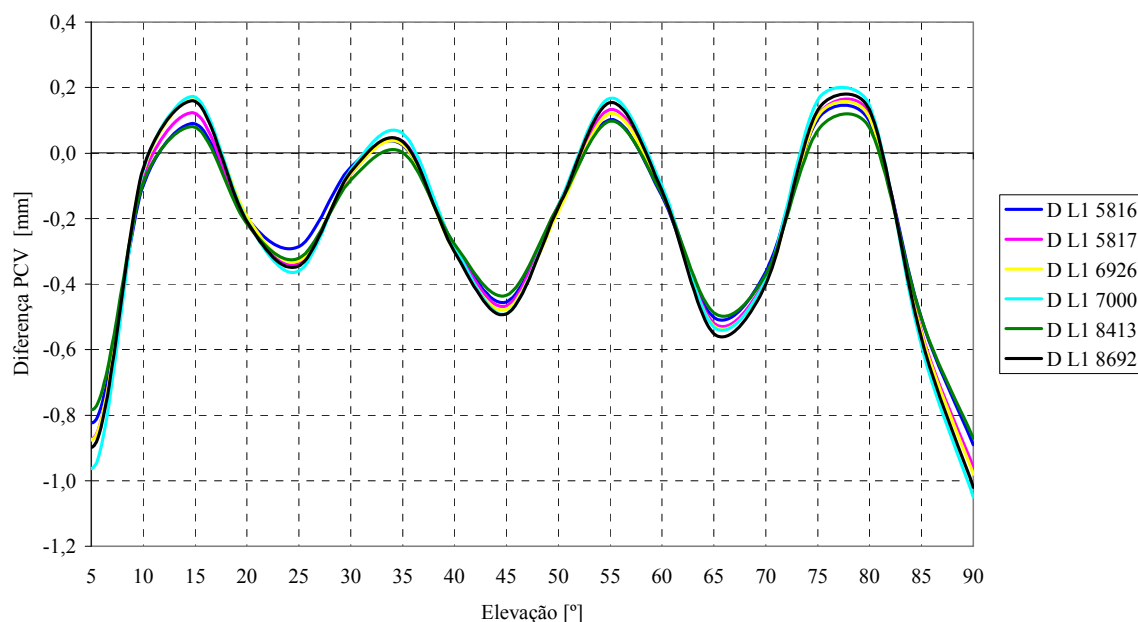


Observa-se que em ambas as portadoras as curvas são similares e coincidem para algumas elevações. As diferenças ( $D$ ) entre as duas variantes ( $+AE$  e  $+E$ ) em  $L_1$  e em  $L_2$  foram calculadas para as seis antenas conforme a equação

$$D = PCV_{(+AE)} + PCV_{(+E)} \quad (4.1)$$

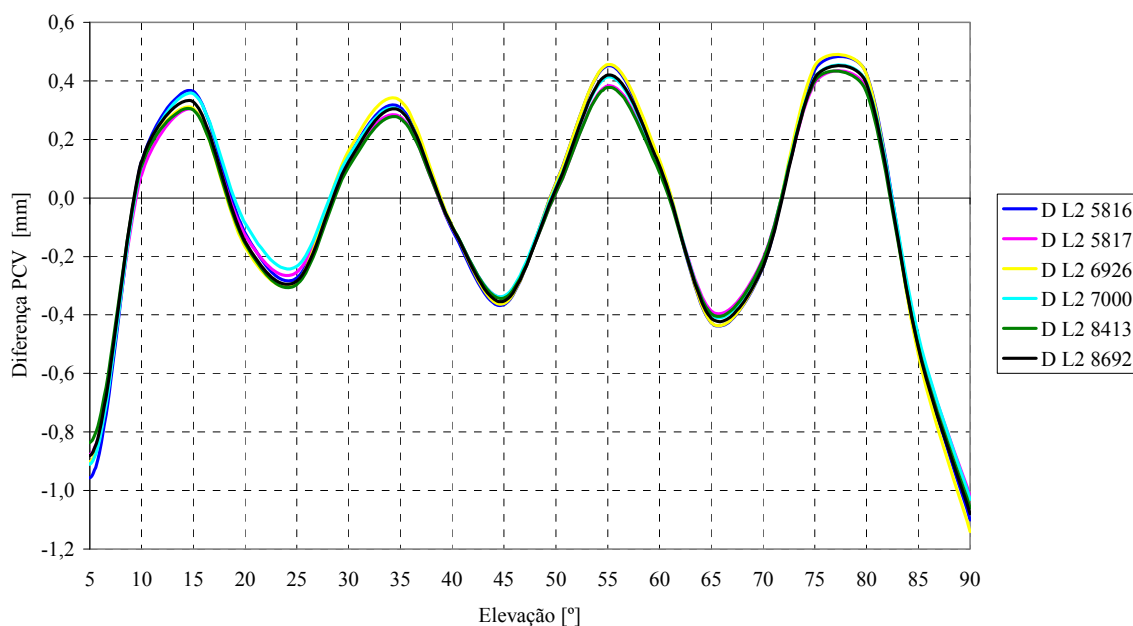
e representadas na figura 60 e na figura 61.

FIGURA 60–DIFERENÇA ENTRE OS RESULTADOS DAS OPÇÕES PARA A DETERMINAÇÃO DAS PCV NA PORTADORA L<sub>1</sub>, ANTENAS TRM22020.00



As máximas diferenças verificadas na portadora L<sub>1</sub> foram próximas a 1 mm no zênite e em 5° de elevação. Observa-se que entre 7,5° e 85° as diferenças se encontram entre 0,2 mm e -0,6 mm. As diferenças na portadora L<sub>2</sub> (figura 61) apresentam comportamento similar entre 7,5° e 85°, com máximo de 0,45 mm e mínimo de -0,4 mm. Em ambas as portadoras, é possível notar que as diferenças aumentam à medida que se tem ângulos de elevação mais altos. WANNINGER (2004c) encontrou diferenças inferiores a 1 mm, que é inferior ao esperado para a precisão de correções dependentes de elevação. Desta análise, constata-se que o diagrama das PCV dependentes de elevação (opção +E) é similar ou muito próximo ao diagrama da média dos valores delineados pelas PCV dependentes de azimuth e elevação (opção +AE).

FIGURA 61–COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS OPÇÕES PARA A DETERMINAÇÃO DAS PCV NA PORTADORA L<sub>2</sub>, ANTENAS TRM22020.00



#### 4.1.4 Análise das PCV Dependentes de Azimute e Elevação

As variações do centro de fase dependentes de azimute e elevação também foram determinadas via calibração (seção 3.3.2). Estas grandezas podem ser representadas em gráficos de superfície que apresentam o horizonte da antenna GPS em suas variações do centro de fase (PCV) dadas em função da distribuição dos satélites em azimute de 0° a 360° e em elevação de 0° a 90°. Na figura 62, observa-se um gráfico de superfície que representa o diagrama de fase da antenna LEIAT502 (SN1325), calibrada no pilar NPF2. Estes valores também podem ser representados em um diagrama de fase plano, em que as PCV são reconhecidas conforme uma escala de cores (figura 63).

FIGURA 62–REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENA LEIAT502, PILAR NPF2

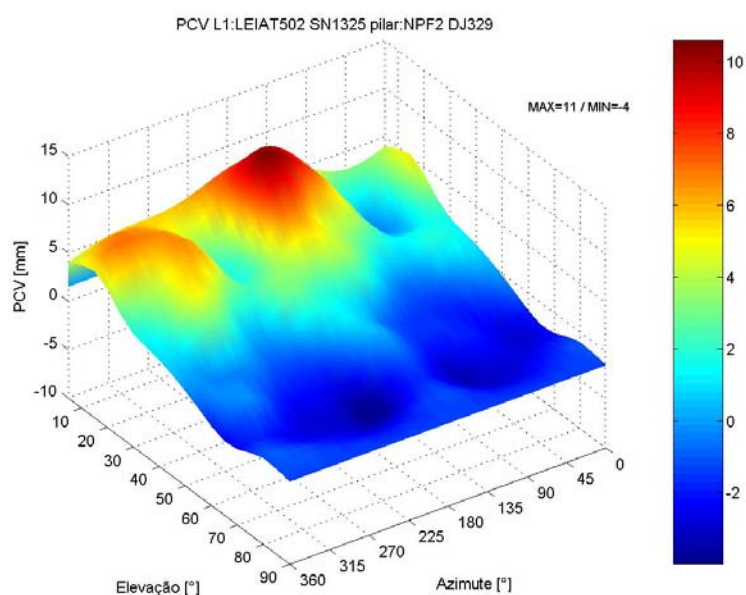
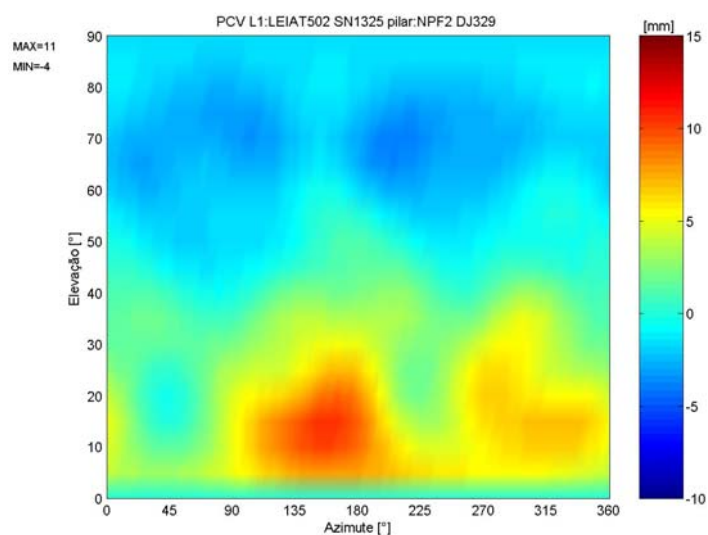


FIGURA 63–REPRESENTAÇÃO PLANA DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENA LEIAT502, PILAR NPF2

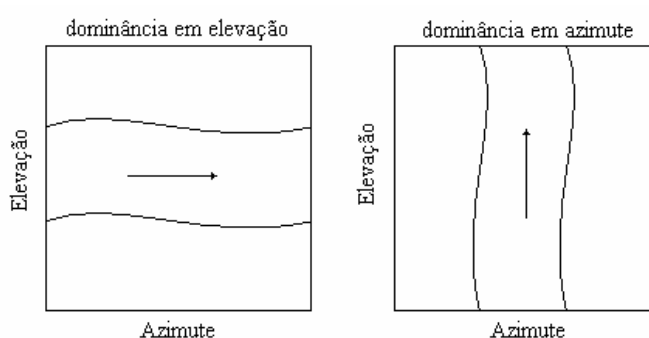


Nestas representações, as PCV podem se apresentar sob diferentes arranjos de cores pelo fato de ocorrerem com mais frequência em uma determinada direção (azimute ou elevação). Esta característica delinea no gráfico regiões que descrevem o

aspecto das PCV ao longo do hemisfério da antena. Assim, dois tipos de situações podem ser distinguidas: a dominância em elevação e a dominância em azimute.

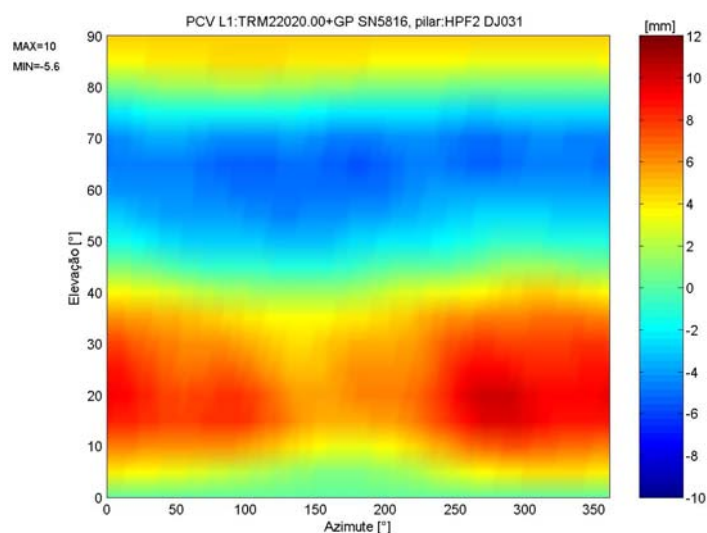
A dominância em elevação (figura 64, lado esquerdo) é caracterizada pela constância das PCV no sentido azimutal para um determinado intervalo de elevação. A dominância em azimute (figura 64, lado direito) é caracterizada pela constância das PCV no sentido da elevação para um determinado intervalo de azimute.

FIGURA 64—TIPOS DE DOMINÂNCIAS DA PCV EM ANTENAS GPS



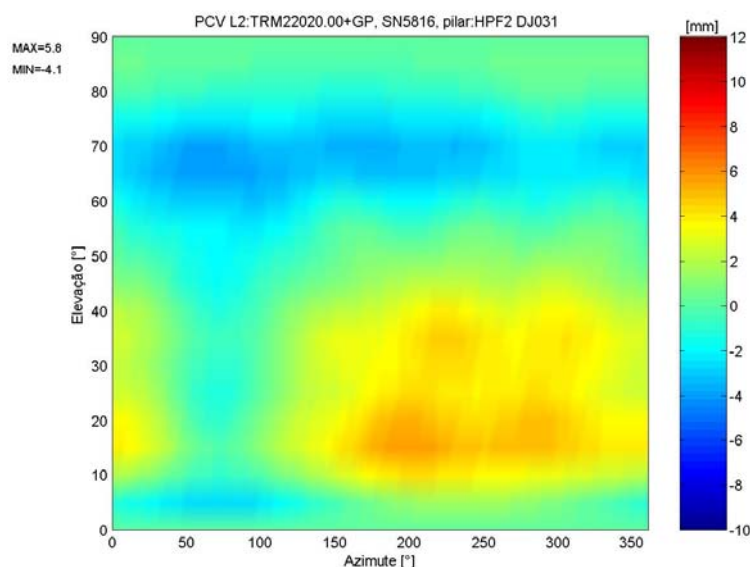
Este conceito, elucidado na figura 64, é exemplificado através dos resultados da antena TRM22020.00+GP SN5816, cujas PCV apresentam dominâncias em elevação entre 55° e 90°, principalmente na portadora  $L_1$  (figura 65).

FIGURA 65—PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA  $L_1$ , ANTENA TRM22020.00+GP SN5816, PILAR HPF2



Na portadora  $L_2$  verifica-se uma faixa de dominância no intervalo aproximado de  $50^\circ$  a  $100^\circ$  de azimute em até  $55^\circ$  de elevação (figura 66). Observa-se que nesta região as PCV assumem valor constante de 2 mm.

FIGURA 66—PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA  $L_2$ ,  
ANTENA TRM22020.00+GP SN5816, PILAR HPF2



O conceito de dependência das PCV em relação a uma determinada direção é utilizado na investigação das influências sistemáticas provenientes do entorno da estação ou da arquitetura da antena, assunto da seção 4.3.

As PCV mostradas no âmbito deste trabalho pertencem ao nível de calibração absoluto, uma vez que foram deduzidas a partir de correções absolutas da antena de referência (seções 2.3.4 e 2.3.5). Na seção 4.2 são realizadas algumas comparações a fim de verificar a proximidade entre estes resultados.

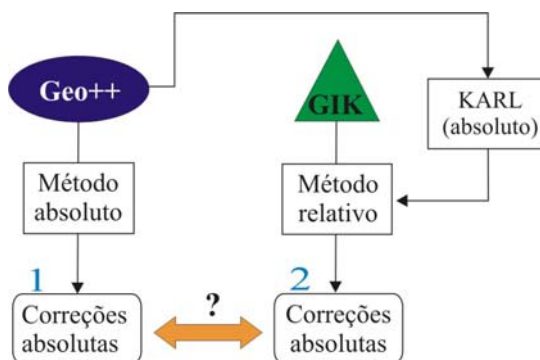
#### 4.2 COMPARAÇÃO ENTRE CALIBRAÇÕES ABSOLUTAS

A compatibilidade entre dois grupos de correções pertencentes à mesma realização foi investigada. O primeiro grupo consiste das correções determinadas por calibração absoluta pela firma Geo++. O segundo grupo são as correções determinadas



por calibração relativa no GIK, com emprego da antena de referência KARL, corrigida no nível absoluto (figura 67).

FIGURA 67–COMPARAÇÃO ENTRE CALIBRAÇÕES ABSOLUTAS



Seis antenas modelo TRM22020.00+GP foram calibradas por método relativo nos pilares HPF2 e NPF2. As mesmas antenas já haviam sido calibradas individualmente pela firma GEO++, por método absoluto. Os resultados dessas calibrações foram cedidos pelas agências proprietárias dos instrumentos para a realização desta pesquisa.

As PCV foram apresentadas na figura 53 (p. 100, portadora  $L_1$ ) e na figura 54 (p. 101, portadora  $L_2$ ) para a calibração no pilar HPF2, e na figura 55 (p. 101, portadora  $L_1$ ) e na figura 56 (p. 102, portadora  $L_2$ ) para a calibração no pilar NPF2. Os dados da calibração absoluta realizada pela firma GEO++ (seção 2.3.3) estão representados na figura 68 (portadora  $L_1$ ) e na figura 69 (portadora  $L_2$ ). Todos os PCO foram reduzidos a valores de referência (quadro 15, seção 4.1, p. 97).

FIGURA 68–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, CALIBRAÇÃO ABSOLUTA (GEO++), ANTENAS TRM22020.00+GP

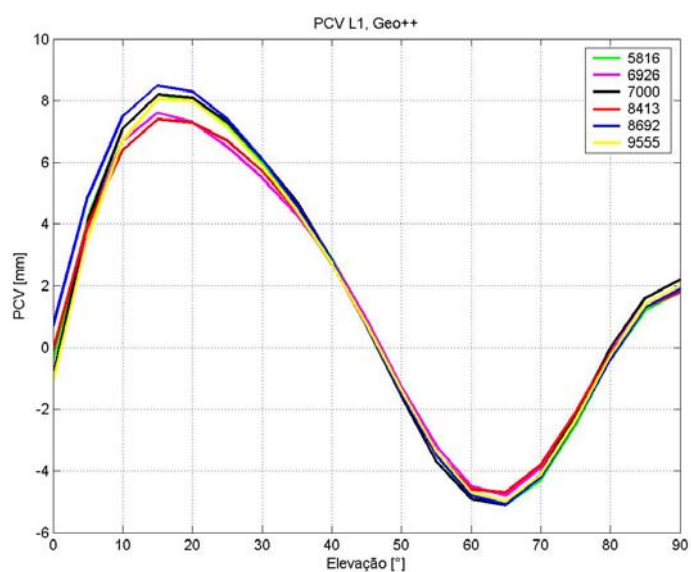
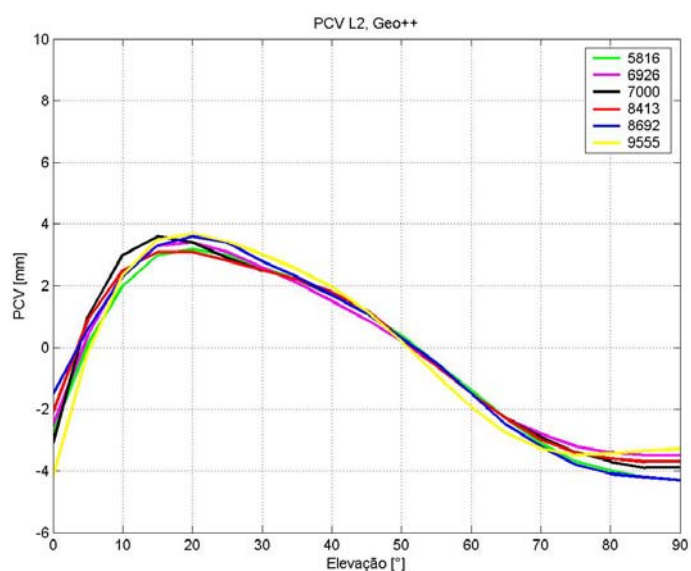


FIGURA 69–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, CALIBRAÇÃO ABSOLUTA (GEO++), ANTENAS TRM22020.00+GP

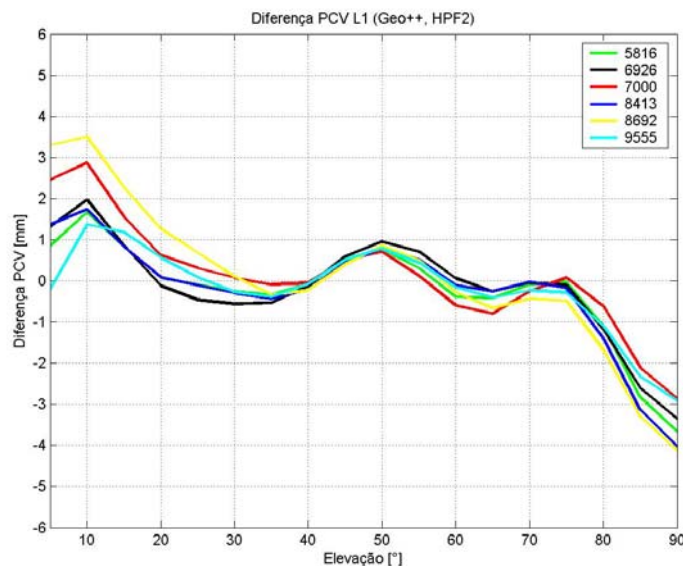


Foram determinadas as diferenças entre os resultados da calibração absoluta (Geo++) e os resultados obtidos via calibração relativa nos pilares HPF2 e NPF2:

$$\begin{aligned}\Delta_{GK}^{HPF2} &= PCV_{GEO++} - PCV_{GK}^{HPF2} \\ \Delta_{GK}^{NPF2} &= PCV_{GEO++} - PCV_{GK}^{NPF2}\end{aligned}\quad (4.2)$$

Na figura 70 são representadas as diferenças das PCV na portadora L<sub>1</sub> (pilar HPF2). As máximas diferenças ocorrem em 10° de elevação para todas as unidades, com valor máximo de até 3,5 mm para a antena SN8692. Entre 40° e 50° as antenas exibem comportamento similar e no zênite a diferença alcança até 4 mm. Na portadora L<sub>2</sub> (figura 71) as diferenças se tornam maiores em elevações acima de 70°.

FIGURA 70–DIFERENÇAS ENTRE PCV NA PORTADORA L1: GEO++, PILAR HPF2, ANTENAS TRM22020.00+GP



As diferenças mostradas na figura 72 são referentes ao pilar NPF2. Observa-se que na portadora L<sub>1</sub> as diferenças oscilam pouco em relação ao pilar HPF2, e.g., variações de até 1 mm para a antena SN8413 em 20° de elevação e para a antena SN7000 no zênite. Na portadora L<sub>2</sub>, as diferenças de um pilar para outro são máximas a partir de 70° de elevação.

FIGURA 71–DIFERENÇAS ENTRE PCV NA PORTADORA L2: GEO++, PILAR HPF2,  
ANTENAS TRM22020.00+GP

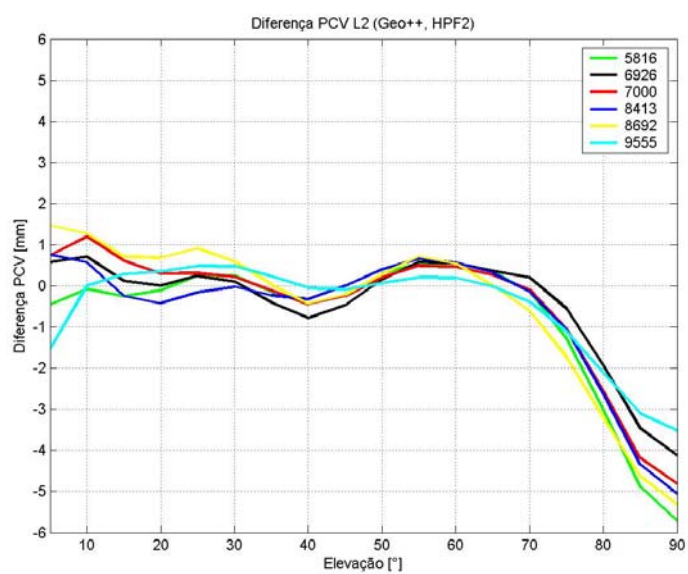


FIGURA 72–DIFERENÇAS ENTRE PCV NA PORTADORA L1: GEO++, PILAR NPF2,  
ANTENAS TRM22020.00+GP

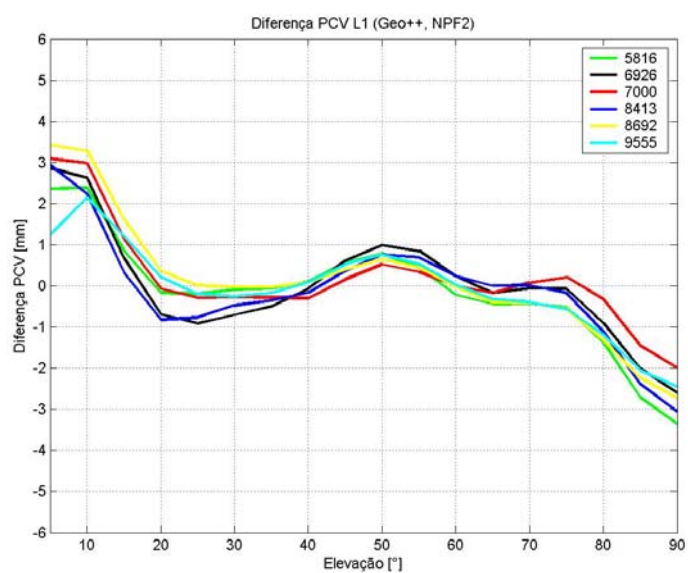
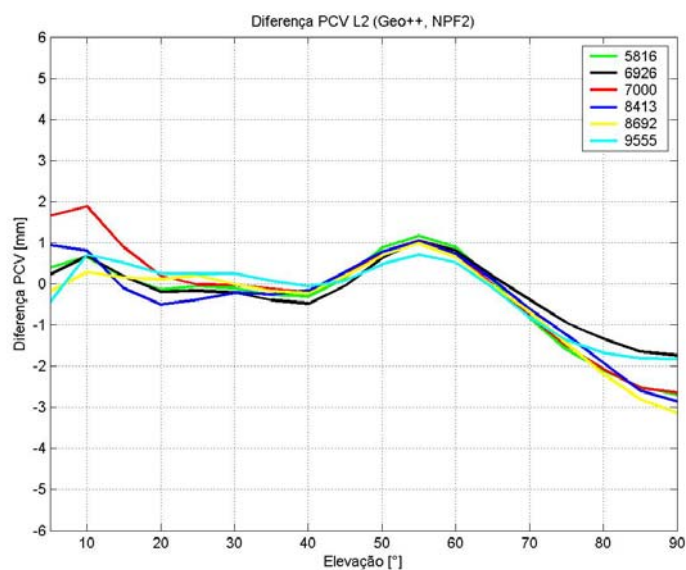


FIGURA 73–DIFERENÇAS ENTRE PCV NA PORTADORA L2: GEO++, PILAR NPF2,  
ANTENAS TRM22020.00+GP



A mesma análise foi realizada com as informações de calibração da antena TRM29659.00 SN7657, submetida à calibração nos pilares HPF2 e NPF2. Esta antena também possui correções absolutas determinadas via calibração individual na firma Geo++.

FIGURA 74–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, CALIBRAÇÃO  
ABSOLUTA NOS PILARES HPF2 E NPF2, ANTENA TRM29659.00 SN7657 (*CHOKE RING*)

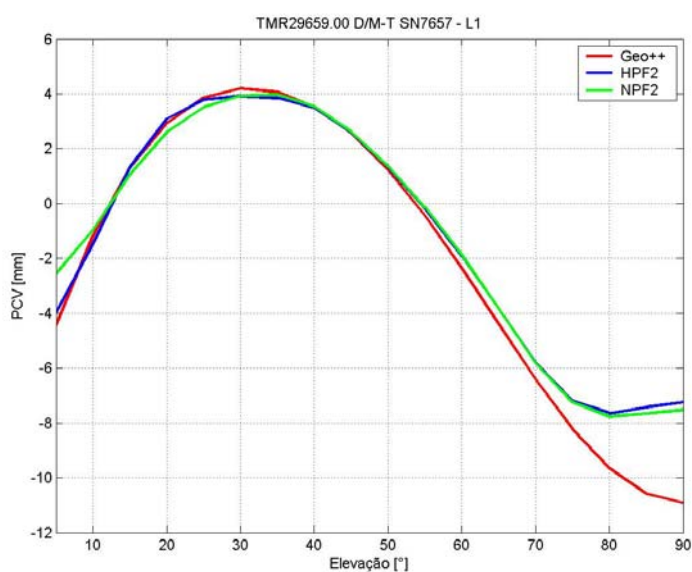
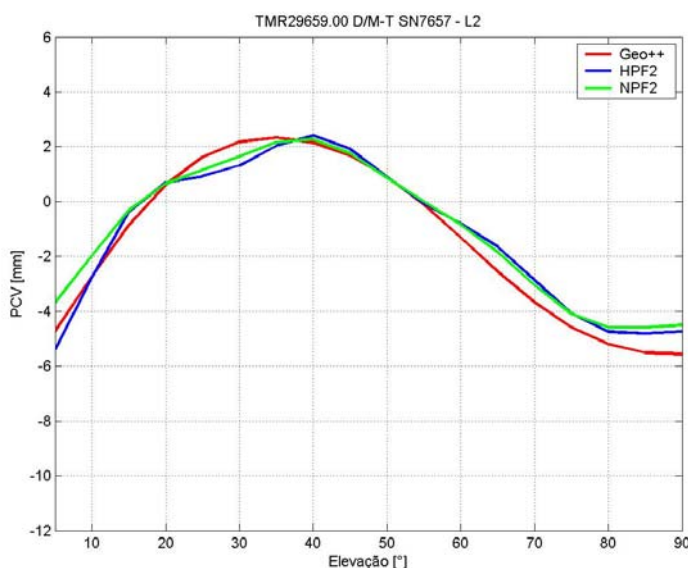


FIGURA 75–PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, CALIBRAÇÃO ABSOLUTA NOS PILARES HPF2 E NPF2, ANTENA TRM29659.00 SN7657 (*CHOKE RING*)



Na portadora  $L_1$  (figura 74) verifica-se que as curvas das PCV referentes à calibração nos pilares HPF2 e NPF2 se aproximam da curva dos resultados absolutos da firma Geo++ no intervalo de 10° a 60° de elevação. A diferença entre calibrações (pilares HPF2 e NPF2) é de poucos décimos de milímetro. Observa-se que as PCV referentes aos pilares HPF2 e NPF2 se sobrepõem no intervalo de 40° a 75°. Na portadora  $L_2$  (figura 75) elas apresentam maior dispersão em relação às correções Geo++, alcançando até 1 mm nas altas elevações.

As observações da calibração individual da antena TRM22020.00+GP SN5816 no pilar NPF2 foram processadas conforme as diferentes possibilidades de realização da antena de referência AOAD/M\_T (seção 2.3.5). No quadro 16 estão resumidas as realizações do IGS/NGS e da firma Geo++ para a antena AOAD/M\_T. Também constam os significados das abreviações indicadas nas legendas da figura 76 (portadora  $L_1$ ), da figura 71 (portadora  $L_2$ ) e da figura 78 (combinação linear  $L_3$ ). No gráfico foram incluídas as correções determinadas pela firma Geo++ (calibração individual da antena SN5816) e as correções de grupo deste modelo de antena disponibilizadas pelo IGS/NGS na Internet.

QUADRO 16 – DESCRIÇÃO DAS VARIANTES DE MODELAGEM DAS PCV

ABREVIACÃO	REALIZAÇÃO	$e >$
Geo++	Valores absolutos provenientes da calibração individual da antena TRM22020+GP SN5816 realizada pela firma Geo++.	0°
NPF2 (absoluto Geo++)	Valores obtidos a partir da antena de referência KARL, consideradas as correções absolutas determinadas pela firma Geo++.	5°
NPF2 (absoluto NGS)	Valores obtidos a partir da antena de referência KARL, consideradas as correções absolutas determinadas pelo IGS/NGS.	5°
NPF2 (relativo NGS)	Valores obtidos a partir da antena de referência KARL, consideradas as correções relativas determinadas pelo IGS/NGS.	10°
NGS (absoluto)	Valores absolutos da antena TRM22020+GP publicados pelo IGS/NGS.	10°
NGS (relativo)	Valores relativos da antena TRM22020+GP publicados pelo IGS/NGS.	10°

Nota:  $e$  representa o ângulo de elevação acima do qual as PCV são válidas.

Destaca-se que as PCV foram geradas após a redução de seus PCO a um valor de referência (quadro 15, p. 97). Os dados de calibração fornecidos pela firma Geo++ abrangem correções das PCV para uma cobertura completa de 0° a 90° de elevação. Entretanto, as correções fornecidas pelo IGS/NGS são restritas à elevação mínima de 10° (seção 2.3.4), o que valida a comparação dos resultados a partir deste valor.

FIGURA 76–VARIANTES DE MODELAGEM DAS PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENAS TRM22020.00+GP SN5816

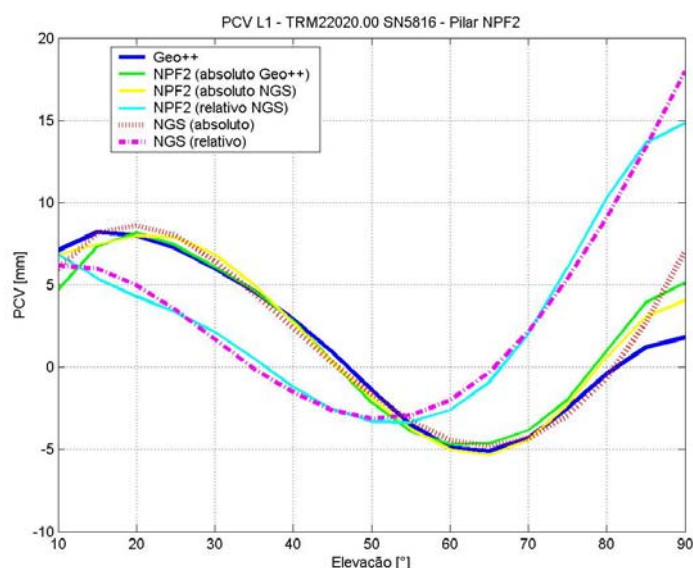




FIGURA 77–VARIANTES DE MODELAGEM DAS PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN5816

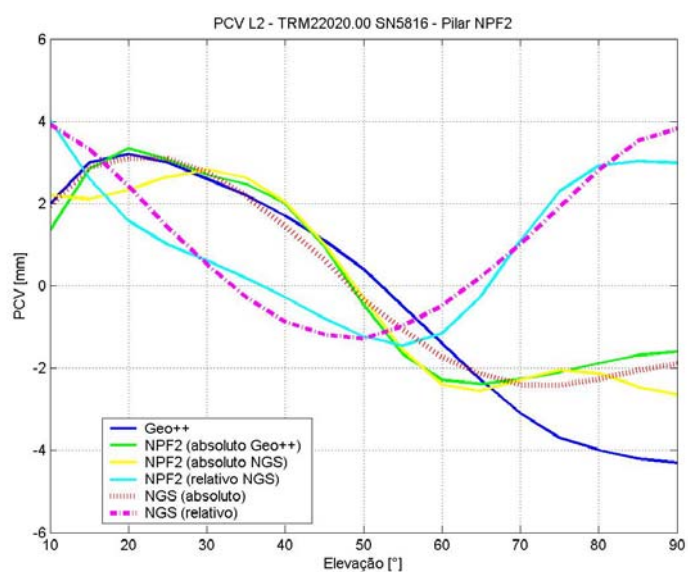
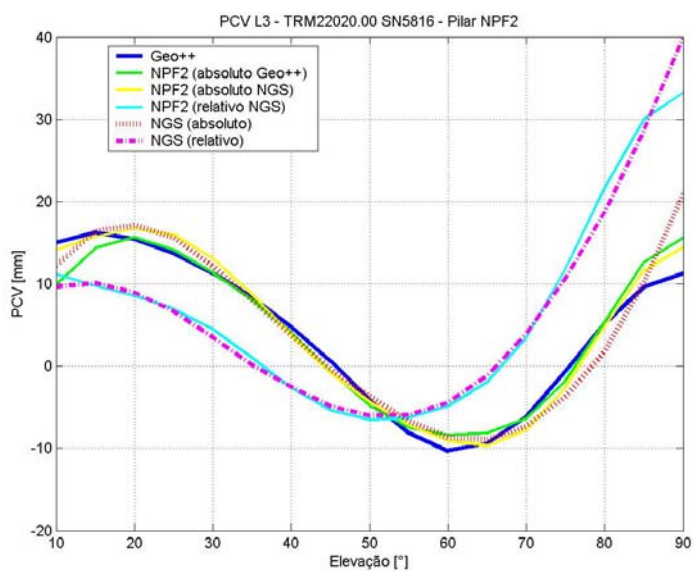


FIGURA 78–VARIANTES DE MODELAGEM DAS PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA COMBINAÇÃO LINEAR L3, ANTENA TRM22020.00 SN5816





Observa-se que em ambas as portadoras (figura 76, figura 77) as curvas se agrupam em dois blocos, delineando o comportamento das variações do centro de fase conforme o nível de calibração. A diferença entre os blocos atinge diferenças máximas acima de  $60^\circ$  de elevação. São verificadas diferenças abaixo do milímetro na comparação com os resultados da firma Geo++ salvo na região zenital em que as diferenças alcançam até 4 mm na portadora  $L_1$ , 2 mm na portadora  $L_2$  e 5 mm na combinação linear  $L_3$ .

As PCV dependentes de azimuth e elevação da antena TRM22020.00+GP SN9555 foram comparadas com os dados provindos da calibração absoluta (Geo++). São apresentados os diagramas de fase na portadora  $L_1$  (figura 79) e na portadora  $L_2$  (figura 80) construídos a partir dos dados desta calibração.

FIGURA 79–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA  $L_1$ , ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, CALIBRAÇÃO ABSOLUTA GEO++

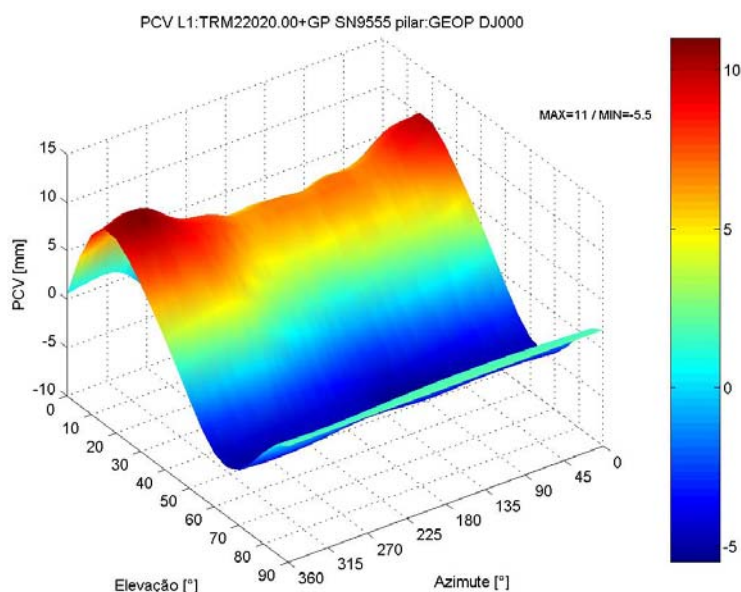
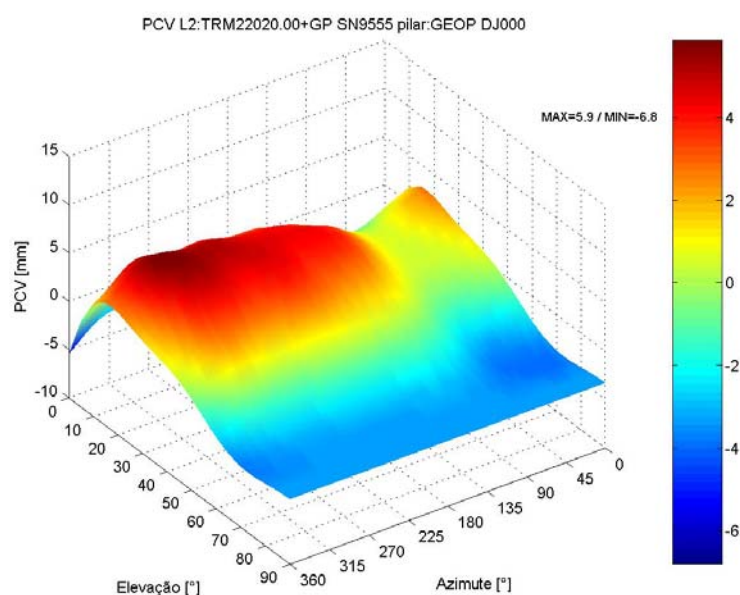


FIGURA 80–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, CALIBRAÇÃO ABSOLUTA GEO++



Na sequência, são apresentados os gráficos das PCV construídos a partir das medições conduzidas nas estações HPF2 (figura 81, figura 82) e NPF2 (figura 83, figura 84) com a antena TRM22020.00+GP SN 9555.

FIGURA 81–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, CALIBRAÇÃO NO PILAR HPF2

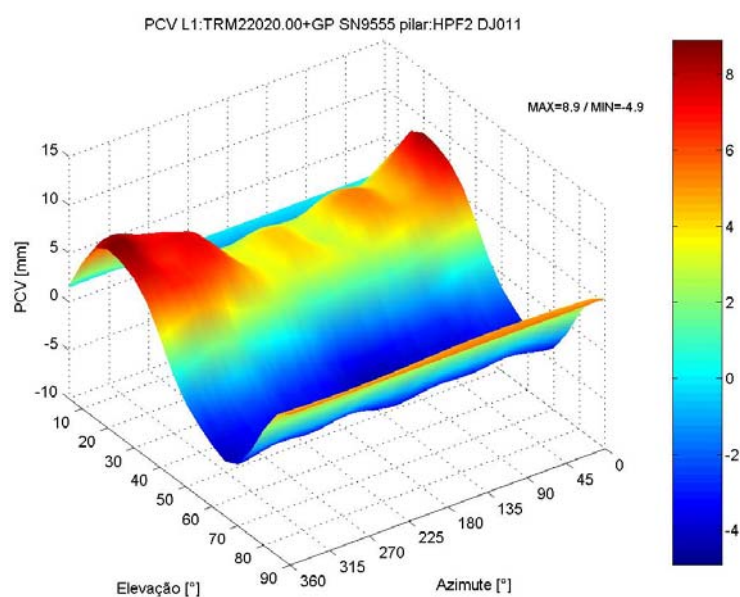


FIGURA 82–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, CALIBRAÇÃO NO PILAR HPF2

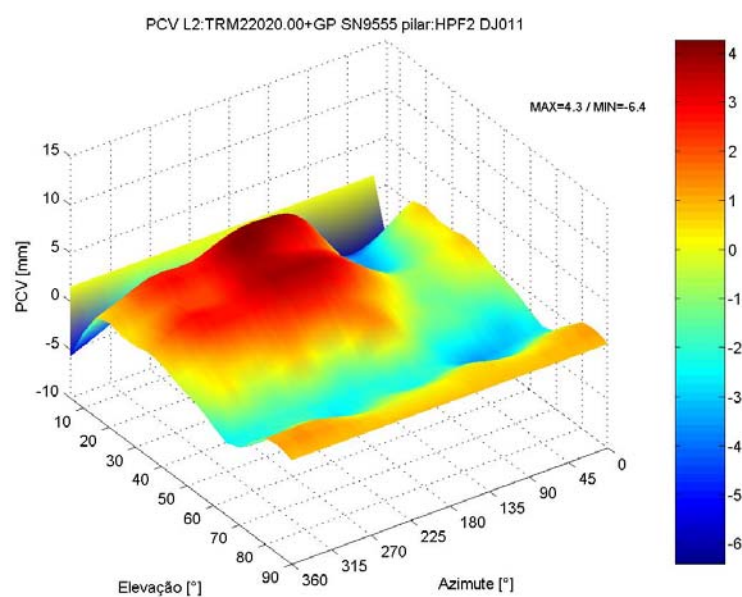


FIGURA 83–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, CALIBRAÇÃO NO PILAR NPF2

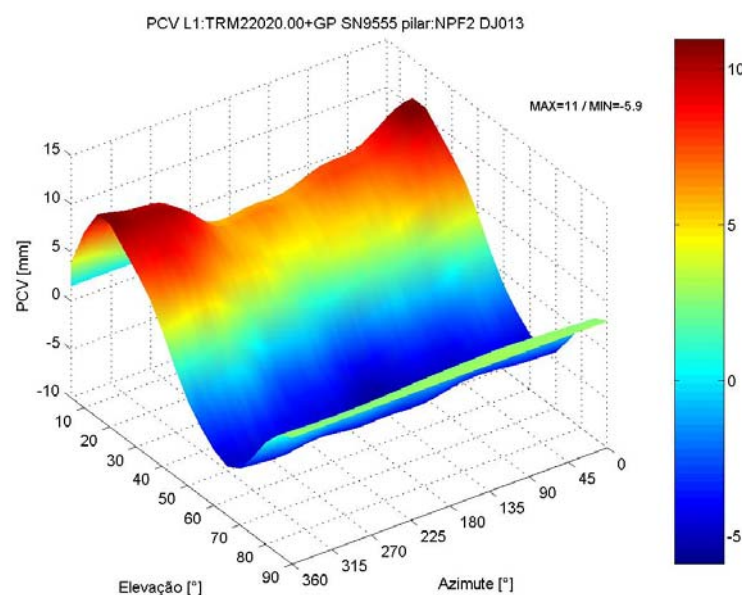
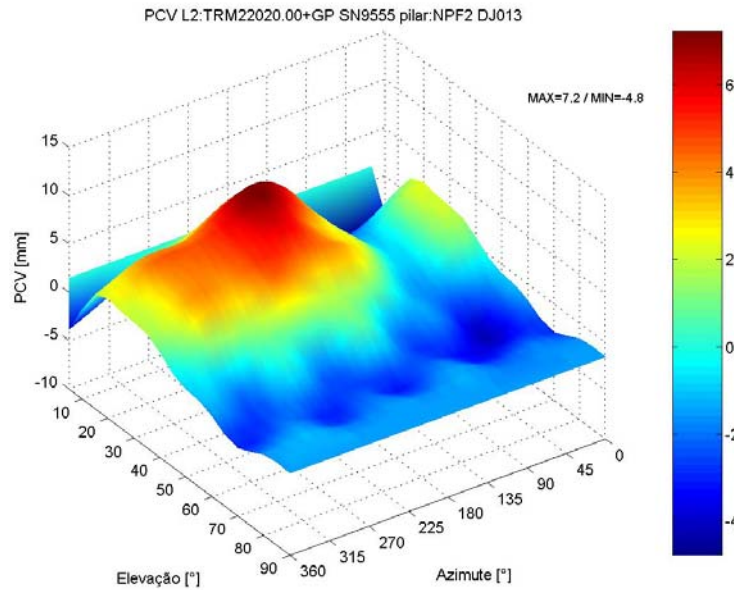


FIGURA 84–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, CALIBRAÇÃO NO PILAR NPF2



Observa-se nos dados Geo++ (figura 79, figura 80) que as PCV assumem valores não-nulos em 0° de elevação. O mesmo não ocorre nos dados da calibração pelo método relativo (GIK). Este fato pode ser explicado pela quantidade de sinais em ângulos baixos de elevação, o que representa uma restrição ao cálculo das PCV no método relativo (WANNINGER, 2004c). As medições realizadas no pilar NPF2 geraram a configuração de PCV mais próxima a da calibração absoluta (Geo++) em ambas as portadoras L<sub>1</sub> e L<sub>2</sub>. Os demais diagramas de fase das antenas SN8918 e SN9555 encontram-se no apêndice 4.

Em um segundo experimento, as PCV absolutas provenientes das calibrações realizadas no GIK foram confrontadas com as PCV absolutas provenientes da calibração individual realizada pela firma Geo++. A diferença foi efetuada conforme a equação 4.4.

$$\Delta = PCV^{Geo++} - PCV^{GIK} \quad (4.4)$$

As ilustrações seguintes (figura 85 a figura 88) mostram os resultados dessa diferença (antena TRM22020.00+GP SN8692).

FIGURA 85–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR HPF2) NA PORTADORA L1, TRM22020.00+GP SN8692

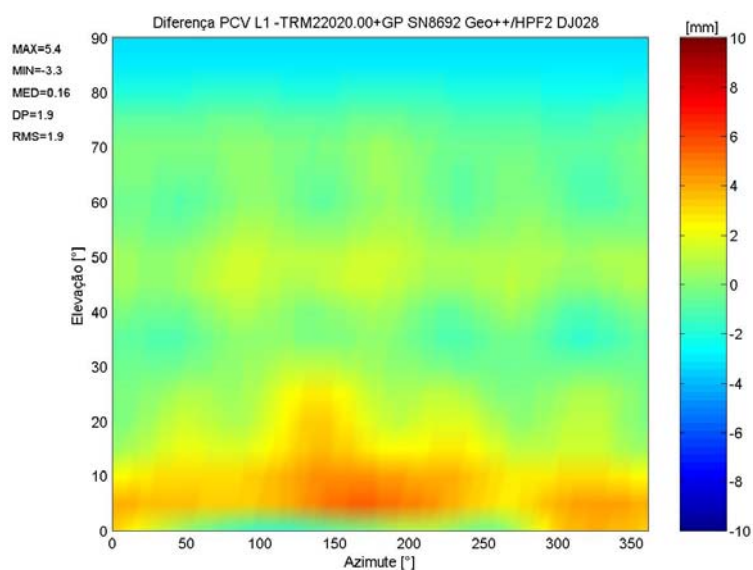


FIGURA 86–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR HPF2) NA PORTADORA L2, TRM22020.00+GP SN8692

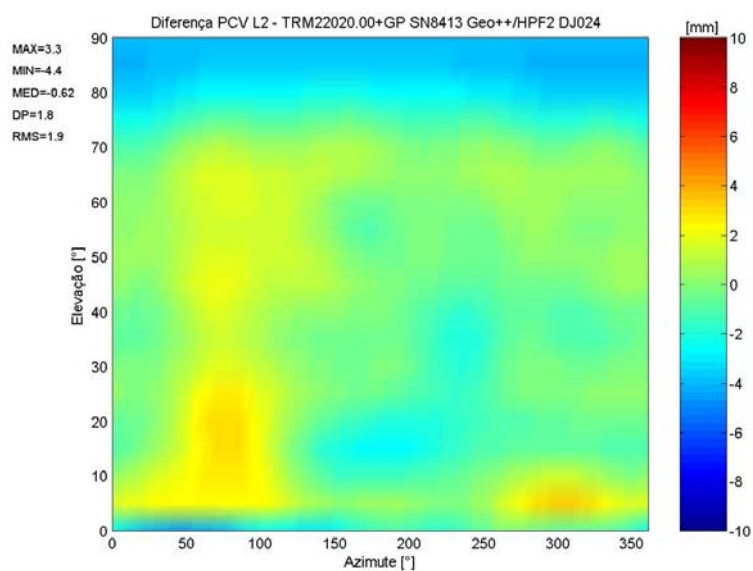


FIGURA 87–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR NPF2) NA PORTADORA L1, TRM22020.00+GP SN8692

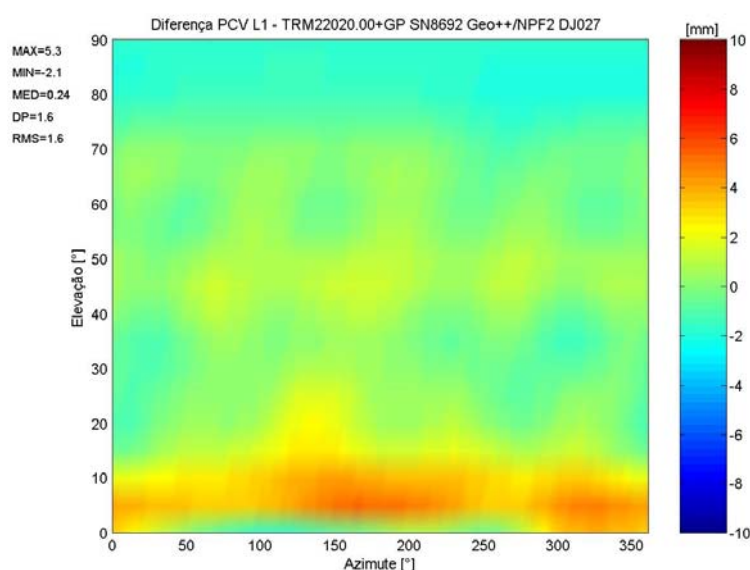
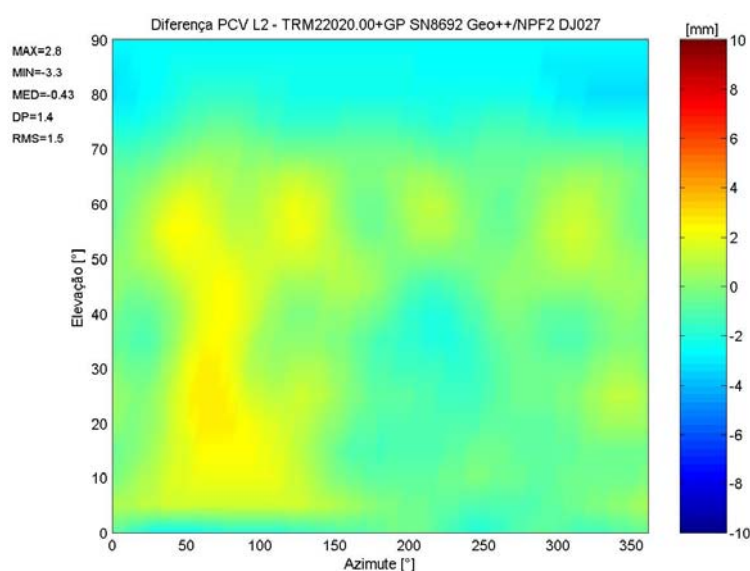


FIGURA 88–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR NPF2) NA PORTADORA L2, TRM22020.00+GP SN8692



Nestas representações são indicados os valores máximos e mínimos, a média das diferenças (índice MED), o desvio-padrão (indicado por DP) e o valor quadrático médio (RMS). Para a ocupação no pilar HPF2 (figura 85), são verificadas diferenças próximas a 3 mm na portadora L<sub>1</sub>. No pilar NPF2 (figura 87) estas diferenças são em



torno de 2 mm. Diferenças significativas ocorreram na onda portadora  $L_2$  (figura 86, figura 88) em ângulos de elevação superiores a  $75^\circ$ , com diferenças de 4 mm no pilar HPF2 (figura 86) e diferenças de 3 mm no pilar NPF2 (figura 88). Observa-se, neste caso, que nas altas elevações (e.g., acima de  $70^\circ$ ) as diferenças montam acima de 4 mm com dominância em elevação. Constata-se também dominância em azimuth no intervalo entre  $50^\circ$  e  $100^\circ$ , para ambos em ambos os pilares, com diferenças de até 4 mm. Os próximos gráficos mostram as diferenças entre PCV calculadas conforme a equação 4.4 para as informações da antena TRM29659.00 SN7657 (*choke ring*).

FIGURA 89–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR HPF1) NA PORTADORA L1, TRM29659.00 SN7657

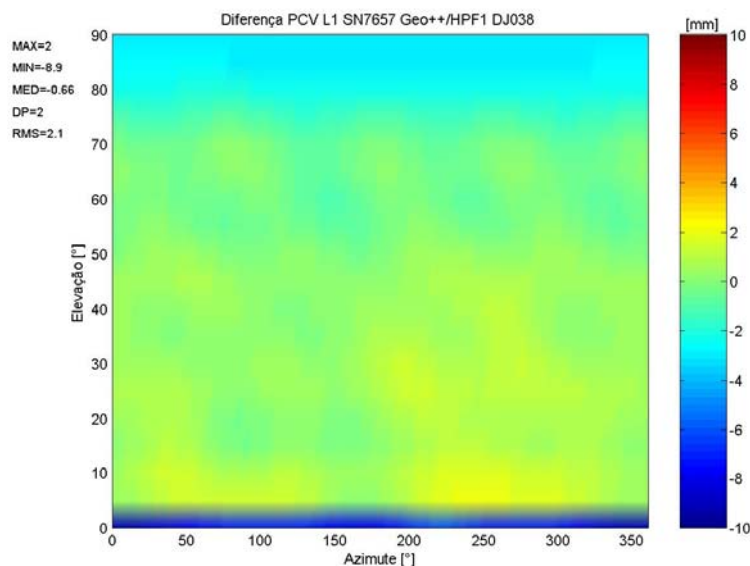


FIGURA 90–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR HPF1) NA PORTADORA L2, TRM29659.00 SN7657

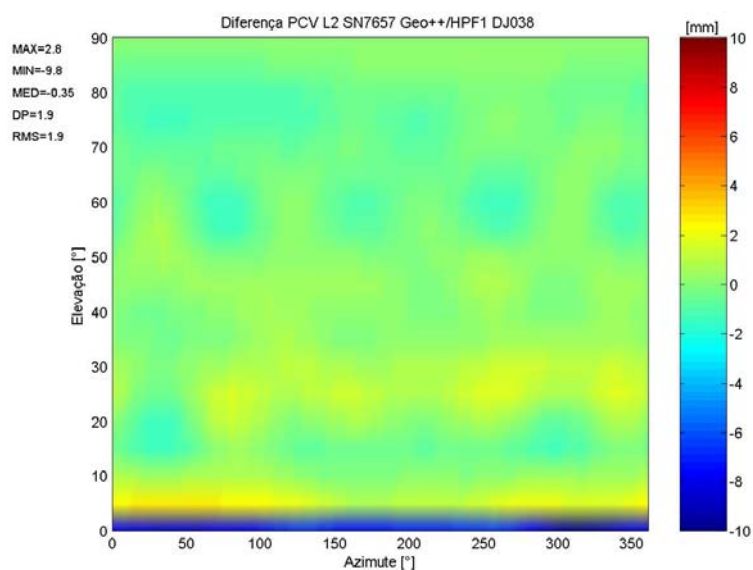


FIGURA 91–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR NPF1) NA PORTADORA L1, TRM29659.00 SN7657

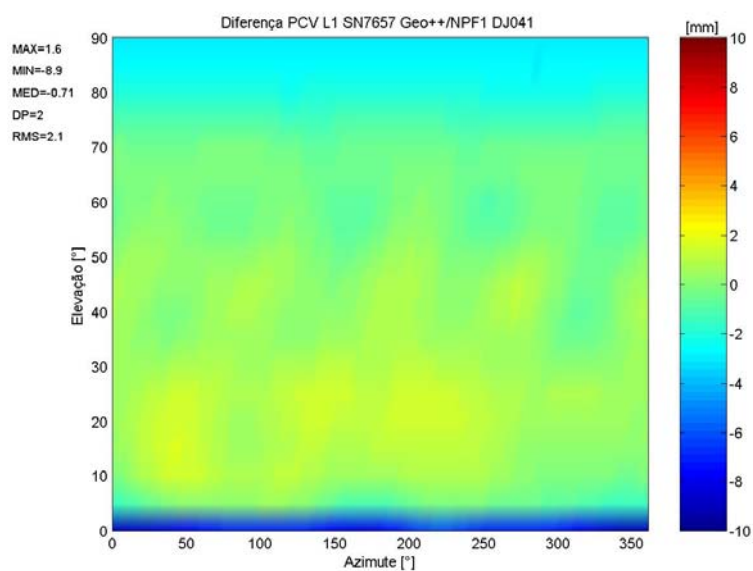
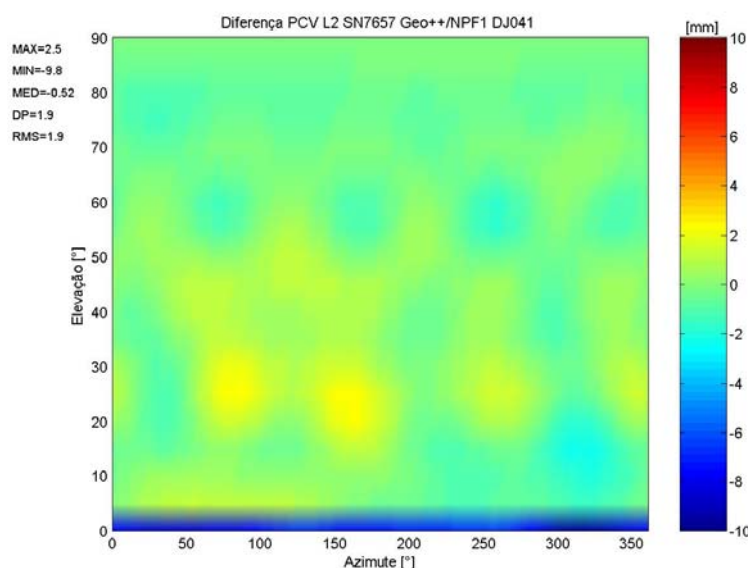




FIGURA 92–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE RESULTADOS GEO++ E GIK (PILAR NPF1) NA PORTADORA L2, TRM29659.00 SN7657



Pela análise das diferenças entre as correções absolutas determinadas pela calibração relativa no GIK e as correções determinadas pela Geo++, conclui-se que a antena empregada no rastreo é um fator a ser considerado nesta comparação. Nas observações com a antena TRM22020.00+GP constataram-se diferenças máximas de até 5,4 mm em ângulos de elevação abaixo de 10 graus de elevação (figura 83), enquanto nas observações com a antena TRM29659.00 (*choke ring*) as alterações foram de até 2,8 mm (considerando ângulo de elevação acima de 5°). Em geral, as correções absolutas determinadas pelo GIK correspondem às correções da Geo++, contudo deve ser observar que o efeito de multicaminho interfere nas observações.

Comparando os resultados dos pilares HPF1 (figura 89 e figura 90) e NPF1 (figura 91 e figura 92) observa-se que não há alterações significativas quando do emprego da antena *choke ring*. As diferenças são de até 2 mm exceto em elevações inferiores a 5°, região para a qual a diferença entre PCV não é válida (quadro 16). Com relação ao valor médio das diferenças (indicador MED) nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$ , observa-se que os valores são negativos, indicando que, em geral, as PCV provindas do método relativo (GIK) são maiores que as PCV provindas do método absoluto (Geo++). Pode-se afirmar que a antena TRM22020.00 SN8692 apresentou melhor

comportamento no pilar NPF2, para o qual as diferenças em relação à calibração absoluta (Geo++) foram menores. Da mesma forma para a antena SN7657, a qual apresentou diferenças de PCV menores no pilar NPF2 do que no pilar NPF1. Assim, pode-se supor que o processo de calibração conduzido no pilar NPF2 proporcionou os resultados que mais se aproximaram das PCV provindas da calibração absoluta (Geo++).

#### 4.3 INFLUÊNCIA DO ENTORNO DA ESTAÇÃO E DA ARQUITETURA DA ANTENA NAS PCV

Estações GPS estão sujeitas à condições de entorno distintas, indicando que medições GPS nestas estações, ainda que conduzidas com os mesmos instrumentos, conduzem a diferentes resultados (seção 4.1). Antenas de mesmo modelo apresentam comportamento eletrônico distinto se forem considerados o entorno da estação (e.g., tipo de adaptadores e forma dos pilares) (BÖDER et al., 2001; SCHMITZ e WÜBBENA, 2001) e a construção do instrumento com relação às diferenças arquitetônicas (e.g., radomes, plano de terra ou *choke rings*). Por arquitetura da antena entende-se como sendo o conjunto de características físicas que perfazem o instrumento como um todo. Nela, incluem-se as particularidades que normalmente agregam uma função específica na antena, e.g., radomes, plano de terra e *choke ring*. Há pequenos detalhes construtivos (e.g., o formato do invólucro) que podem influenciar no diagrama de fase da antena.

Na seção 4.3.1, são mostradas as diferenças entre calibrações em diferentes pilares. As influências do plano de terra nos diagramas de fase de duas antenas TRM22020.00 são investigadas na seção 4.3.2. Os resultados de calibração visando identificar influências de outros detalhes construtivos da antena, e.g., a forma do invólucro, são mostrados na seção 4.3.3.

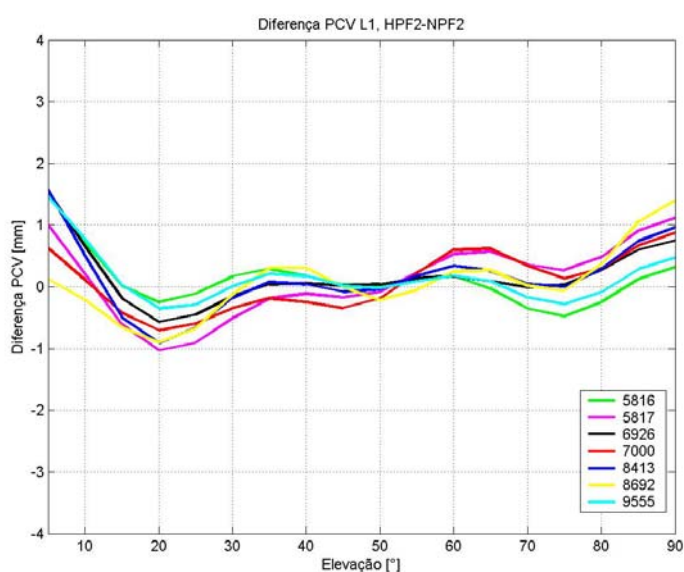
### 4.3.1 Calibração em Diferentes Pilares

A presente análise se refere aos resultados da calibração relativa de sete antenas modelo TRM22020.00+GP (seção 4.2) nos pilares HPF2 e NPF2. A dependência dos resultados com a localidade da calibração foi investigada por meio da diferença entre PCV dependente de elevação.

$$\Delta = PCV^{HPF2} - PCV^{NPF2} \quad (4.3)$$

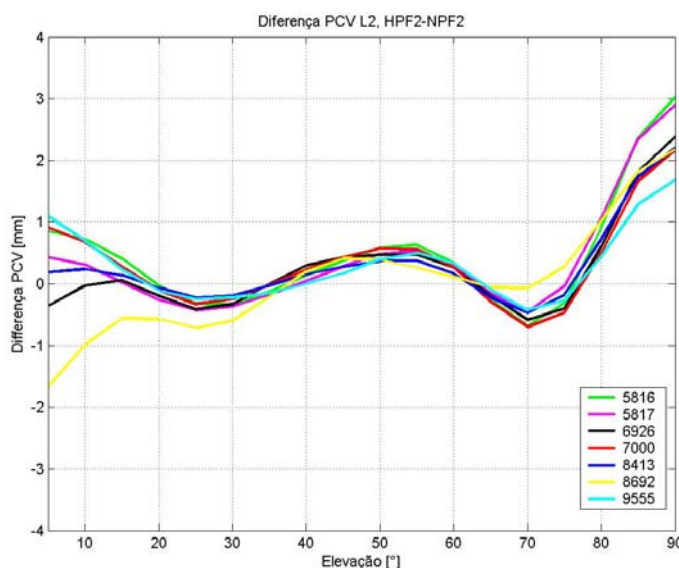
Pela análise da figura 93, verificam-se diferenças máximas de cerca de 1,5 mm na portadora L<sub>1</sub>. Na portadora L<sub>2</sub> (figura 94) estas diferenças são inferiores a 3 mm.

FIGURA 93–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1, ANTENAS TRM22020.00+GP



As maiores diferenças podem estar associadas à qualidade das observações nas baixas elevações. Nas altas elevações (acima de 80°) há o problema da baixa densidade de dados GPS nas latitudes média do hemisfério norte (seção 2.3.3).

FIGURA 94–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE ELEVAÇÃO NA PORTADORA L<sub>2</sub>,  
ANTENAS TRM22020.00



As próximas ilustrações apresentam os resultados das PCV deduzidas a partir das calibrações da antena TRM22020.00+GP SN9555 nos pilares HPF2 (figura 24) e NPF2 (figura 25). As medições foram conduzidas em diferentes pilares de calibração visando analisar as alterações dos diagramas de fase obtidos. A figura 95 apresenta as PCV na portadora L<sub>1</sub>.

No intervalo entre 45° e 90° de elevação, observa-se que o aspecto das PCV das duas antenas é similar. Tal fato se deve às características de projeto deste modelo de antena (MAYER, 2006). Nas regiões entre 10° e 45° de elevação é verificado o surgimento de duas zonas com dominância de até 3 mm nos azimutes próximos a 135° e 215°. Na portadora L<sub>2</sub> (figura 96), os valores mínimos são verificados em regiões diferentes do gráfico se comparados com os valores correspondentes da antena SN5816 (figura 66).

FIGURA 95–PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1,  
ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, PILAR HPF2

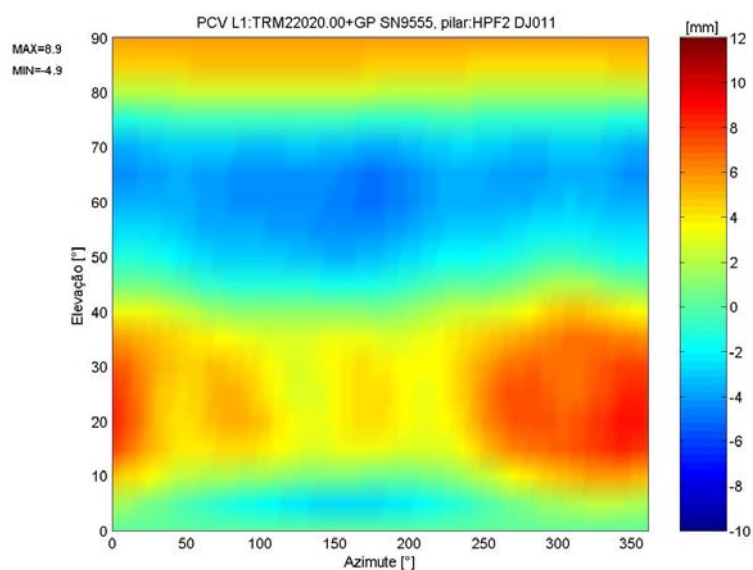
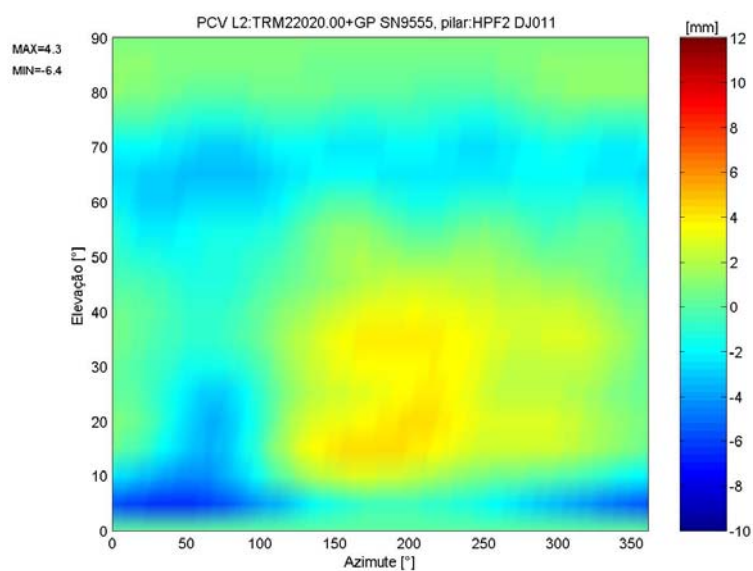


FIGURA 96–PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2,  
ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, PILAR HPF2



Na figura 97 são apresentadas as PCV da antena SN9555 na portadora  $L_1$ , determinadas por calibração relativa no pilar NPF2. Idem na figura 98 para a portadora  $L_2$ .

FIGURA 97–PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1,  
ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, PILAR NPF2

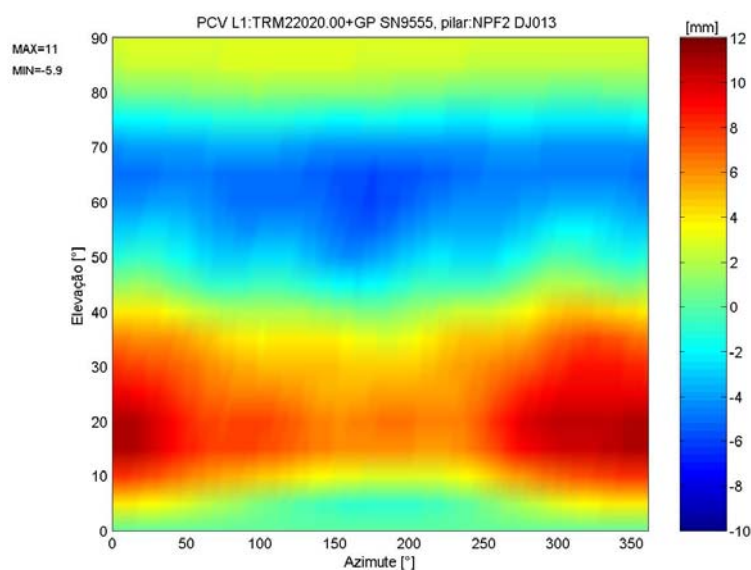
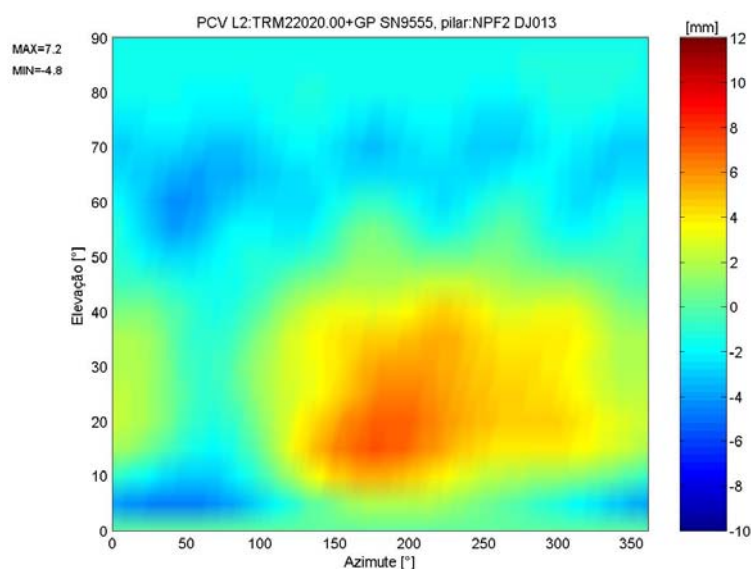


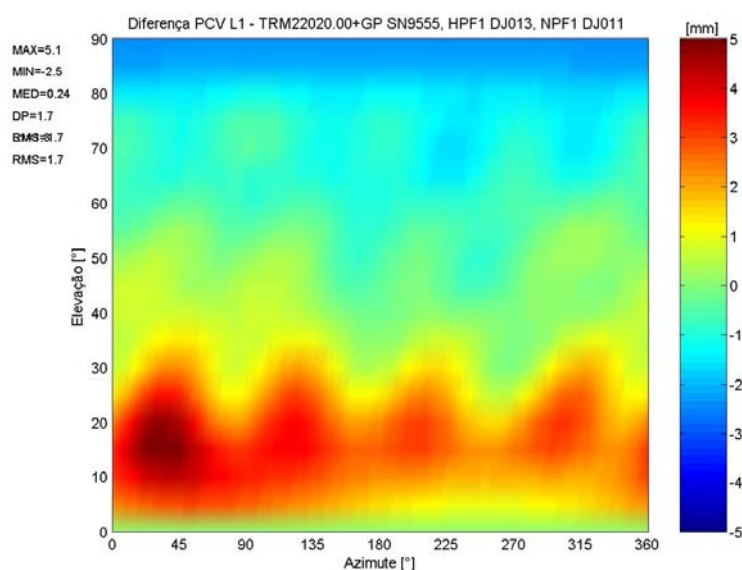
FIGURA 98–PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2,  
ANTENA TRM22020.00+GP SN9555, PILAR NPF2



Pela análise visual entre a figura 95 (pilar HPF2) e a figura 97 (pilar NPF2), bem como entre a figura 96 (pilar HPF2) e a figura 98 (pilar NPF2), constata-se que os valores máximos e mínimos das PCV em ambas as portadoras são diferentes, bem como também o aspecto dos diagramas.

As próximas ilustrações apresentam as diferenças em milímetros entre as PCV deduzidas a partir das calibrações da antena TRM22020.00+GP SN9555 nos pilares HPF2 (figura 24) e NPF2 (figura 25). Observam-se diferenças máximas de até 5,1 mm na portadora  $L_1$  e de até 3,3 mm na portadora  $L_2$ .

FIGURA 99–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE PILARES HPF2 E NPF2 NA PORTADORA  $L_1$ , ANTENA TRM22020.00+GP SN9555



A mesma análise foi realizada com os resultados obtidos na calibração da antena TRM29659.00+GP SN7657 (*choke ring*) nos pilares HPF1 e NPF1. Foram calculadas e representadas as diferenças das PCV nas portadoras  $L_1$  (figura 101) e  $L_2$  (figura 102). Observa-se que os resultados desta antena acumula menores diferenças que os resultados da antena modelo TRM22020.00+GP, apresentando valores máximos e mínimos que não ultrapassam a 1,5 mm na portadora  $L_1$  e a 3 mm na portadora  $L_2$ . Verificam-se também desvios-padrão menores nas duas portadoras.



FIGURA 100–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE PILARES HPF2 E NPF2 NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00+GP SN9555

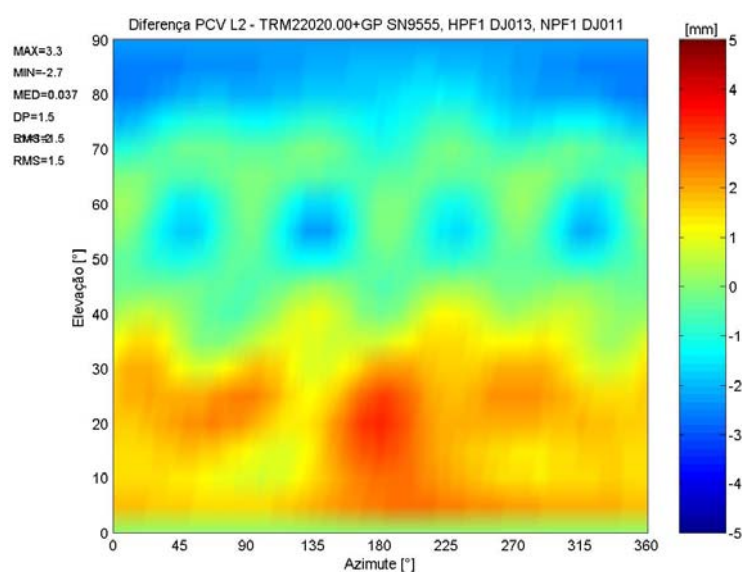


FIGURA 101–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE PILARES HPF1 E NPF1 NA PORTADORA L1, ANTENA TRM29659.00 SN7657 (*CHOKE RING*)

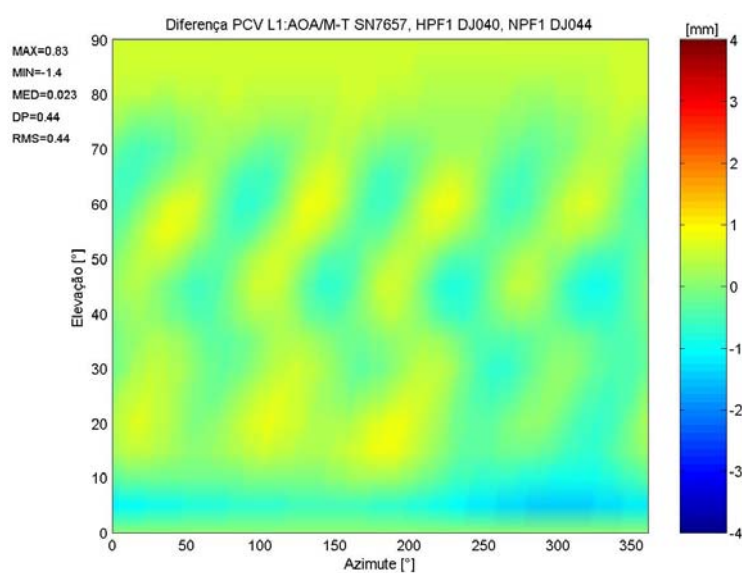
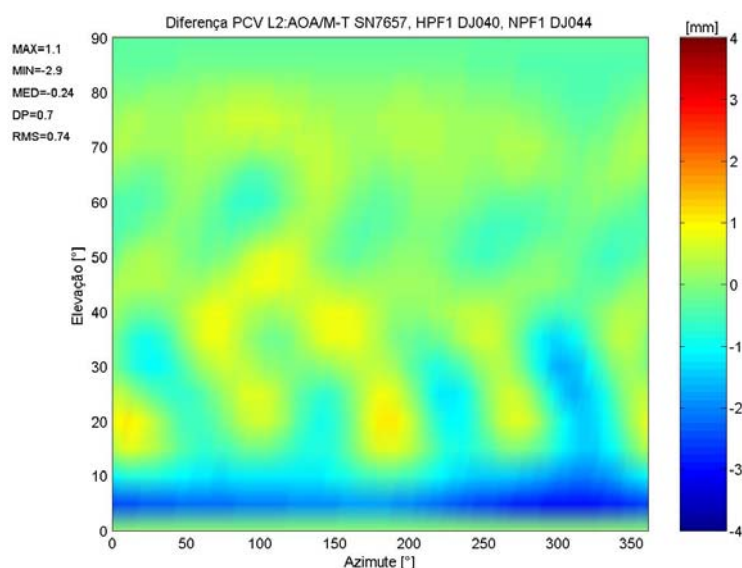




FIGURA 102–DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE PILARES HPF1 E NPF1 NA PORTADORA L2, ANTENA TRM29659.00 SN7657 (*CHOKE RING*)



A influência do intercâmbio da antena entre pilares na componente vertical do PCO pode ser analisada a partir dos resultados de duas antenas modelo TRM22020.00+GP mostrados na figura 110 (antena SN8918, p. 140) e na figura 111 (antena SN9555, p. 140). Considerando as antenas em sua arquitetura original, são constatadas diferenças na componente vertical do PCO de até 6 mm na portadora  $L_1$  e 5 mm na portadora  $L_2$ . A alteração do entorno exerceu pouca influência nas componentes horizontais do PCO, constatando-se diferenças submilimétricas. A contribuição do intercâmbio entre pilares no PCO foi mínima em relação à influência causada pela modificação da arquitetura das antenas (seção 4.3.2).

No apêndice 4 encontram-se os diagramas de fase das antenas LEIAT504, LEIAX1202 e TRM4800, que foram calibradas em diferentes pilares.

#### 4.3.2 Influência do Plano de Terra

Alterações no entorno da antena surgem quando dispositivos ou objetos de qualquer natureza são posicionados próximo às antenas. Estas mudanças influenciam diretamente as observações GPS e conseqüentemente as variações do centro de fase. Estas podem sofrer alterações quando do emprego de diferentes pilares de calibração

(entorno) ou mesmo quando a arquitetura da antena receptora é modificada, e.g., radomes ou plano de terra (seção 3.2.1). Outrossim, as características do plano de terra (diâmetro, material e espessura) definem a característica de recepção de uma antena GPS (SCHMITZ, 2001, p. 109).

Nesta seção busca-se verificar a influência da alteração da arquitetura das antenas GPS nos resultados de calibração. Os experimentos foram realizados empregando duas antenas modelo TRM22020.00 pertencentes ao Instituto de Geodésia de Karlsruhe. Após medições de 24 horas com intercâmbio de antenas entre pilares, o plano de terra (seção 2.2.3) foi retirado e as medições foram repetidas.

As medições se referem às atividades que foram conduzidas entre 11 e 18 de janeiro de 2005 (quadro 11, p. 83, medições de nº31 a 40). Foram ocupados os pilares HPF2 e NPF2, situados na cobertura de medições do observatório astronômico do Instituto de Geodésia de Karlsruhe (figura 24, figura 25). As antenas utilizadas nos testes são identificadas pelos últimos algarismos de seu número de série. A identificação e as características dos instrumentos, extraídas do quadro 11, estão resumidas no quadro 17. Os dados de nivelamento foram extraídos das cadernetas de campo e apresentados no quadro 18, onde estão representadas as diferenças de altura ( $\Delta h$ ) bem como os pilares ocupados.

QUADRO 17 – INFLUÊNCIA DO PLANO DE TERRA: ANTENAS E RECEPTORES

Dia GPS	Pilar	Antena			Proprietário	Receptor	
		Marca	Modelo	N. Série		Modelo	N. Série
011	HPF2	Trimble	22020.00+GP	9555	GIK	4000SSI	A3196
	NPF2	Trimble	22020.00+GP	8918	GIK	4000SSI	A3214
013	HPF2	Trimble	22020.00+GP	8918	GIK	4000SSI	A3196
	NPF2	Trimble	22020.00+GP	9555	GIK	4000SSI	A3214
014	HPF2	Trimble	22020.00-GP	8918	GIK	4000SSI	A3196
	NPF2	Trimble	22020.00-GP	9555	GIK	4000SSI	A3214
015	HPF2	Trimble	22020.00-GP	9555	GIK	4000SSI	A3196
	NPF2	Trimble	22020.00-GP	8918	GIK	4000SSI	A3214

QUADRO 18 – DADOS DO NIVELAMENTO

Data	Pilar	DRB	Leituras (mm)			$\Delta_h$ (mm)
			$H_{(RN)}$	$ARP_{(Karl)}$	$ARP_{(DRB)}$	
11.11.04	HPF2	05	1263,60	2335,26	330,40	-1,4021
	NPF2	04			286,50	-1,3582
13.11.04	HPF2	04	1239,20	2335,26	302,10	-1,3982
	NPF2	05			258,00	-1,3541
14.11.04	HPF2	05	1272,20	2335,26	335,10	-1,3982
	NPF2	04			291,20	-1,3543
15.11.04	HPF2	05	1251,60	2335,26	315,50	-1,3987
	NPF2	04			270,70	-1,3544

O nivelamento das estações e a realização das medições com emprego do mecanismo DRB (seção 3.2.2) foram conduzidos conforme descrito na seção 3.3.1.2. Foram realizadas seções de 24 horas de rastreo contínuo e intercâmbio de antenas entre pilares após cada seção. Foram empregados dois receptores Trimble 4000SSI (SN3214 e o SN3196). Visto que o receptor SN13196 não disponibiliza memória física suficiente para 24 horas de dados, empregou-se uma coletora Trimble TSC1 (SN6291) conectada ao receptor 4000SSI para realizar o controle das medições e suprir o armazenamento dos dados deste receptor (figura 103).

FIGURA 103–COLETORA DE DADOS TRIMBLE TSC1 E RECEPTOR 4000SSI.



Nos dias GPS 011 e 013, as medições foram conduzidas com as antenas montadas em sua arquitetura original (figura 104). Nos dois dias subsequentes (014 e 015), o plano de terra das antenas foi retirado<sup>24</sup> (figura 105) e realizadas novas

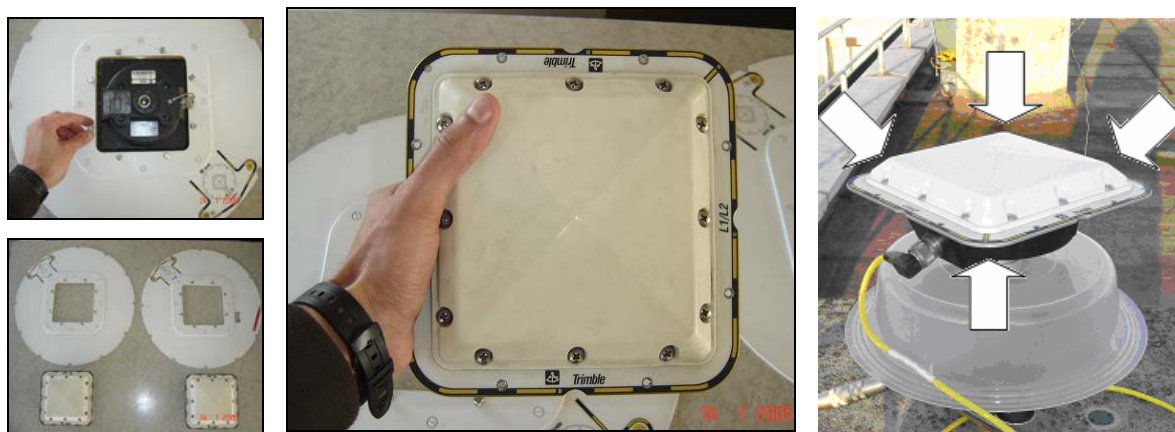
<sup>24</sup> Com a retirada do plano de terra, a antena passa a ser denominada TRM22020.00-GP.

calibrações. O objetivo é avaliar a influência do entorno da antena nos resultados de calibração ante a alteração da arquitetura das antenas GPS (no caso, a retirada do plano de terra).

FIGURA 104–ANTENA TRM22020.00+GP



FIGURA 105–ANTENA TRM22020.00-GP



Conforme descrito na seção 3.3.2, procedeu-se à determinação do PCO e das PCV (+ $AE$ , + $E$ ) por procedimentos de calibração nos pilares HPF2 e NPF2. Estas informações foram extraídas dos arquivos de correção no formato *ant* após a redução dos PCO para valores de referência (seção 4.1.1). As PCV dependentes de elevação nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$  foram representadas para ambas as situações (com e sem o plano de terra). Na figura 106 estão representadas as PCV na portadora  $L_1$ . As antenas são distinguidas por diferentes cores, e a arquitetura da antena pela forma das linhas.

FIGURA 106–PCV NA PORTADORA L1 PARA DIFERENTES ARQUITETURAS, PILAR HPF2

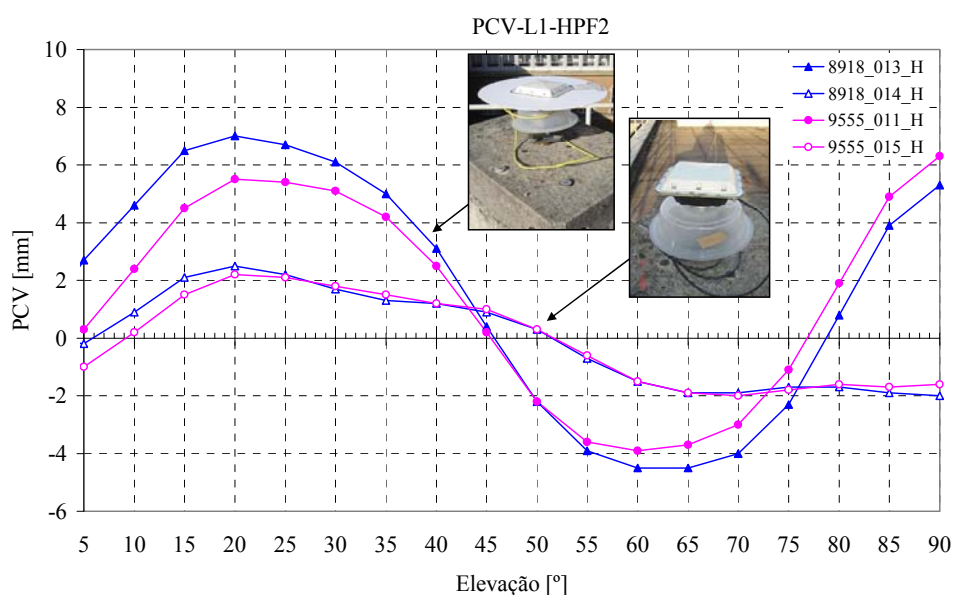
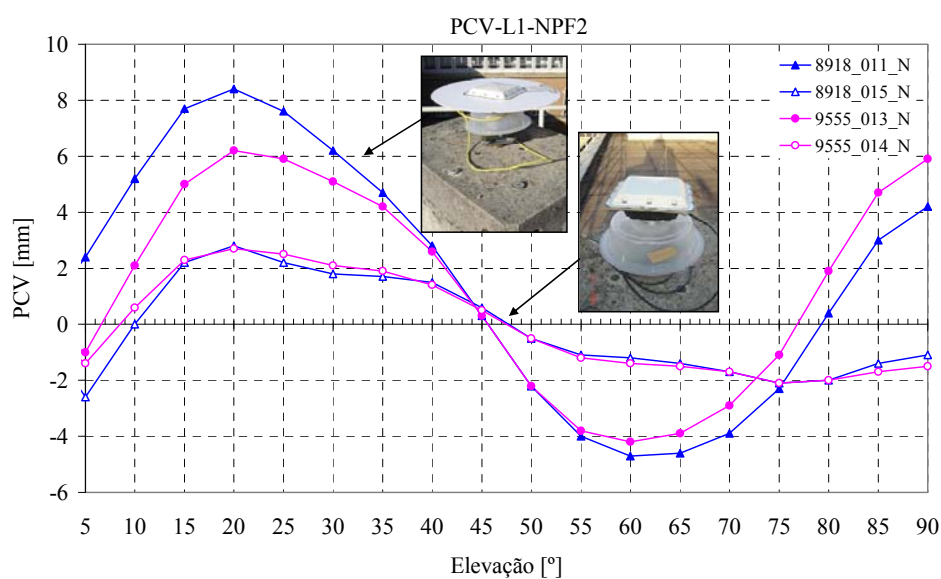


FIGURA 107–PCV NA PORTADORA L1 PARA DIFERENTES ARQUITETURAS, PILAR NPF2



Observa-se que a retirada do plano de terra modificou o comportamento eletrônico das duas antenas, ocasionando o agrupamento das PCV conforme a disposição do plano de terra. Para facilitar esta visualização, foi colocada uma foto da antena ao lado das curvas indicando a presença ou ausência do plano de terra.

Observam-se diferenças de até 6 mm na portadora  $L_1$  e de até 4 mm na portadora  $L_2$  quando se compara o agrupamento das curvas.

FIGURA 108—PCV NA PORTADORA L2 PARA DIFERENTES ARQUITETURAS, PILAR HPF2

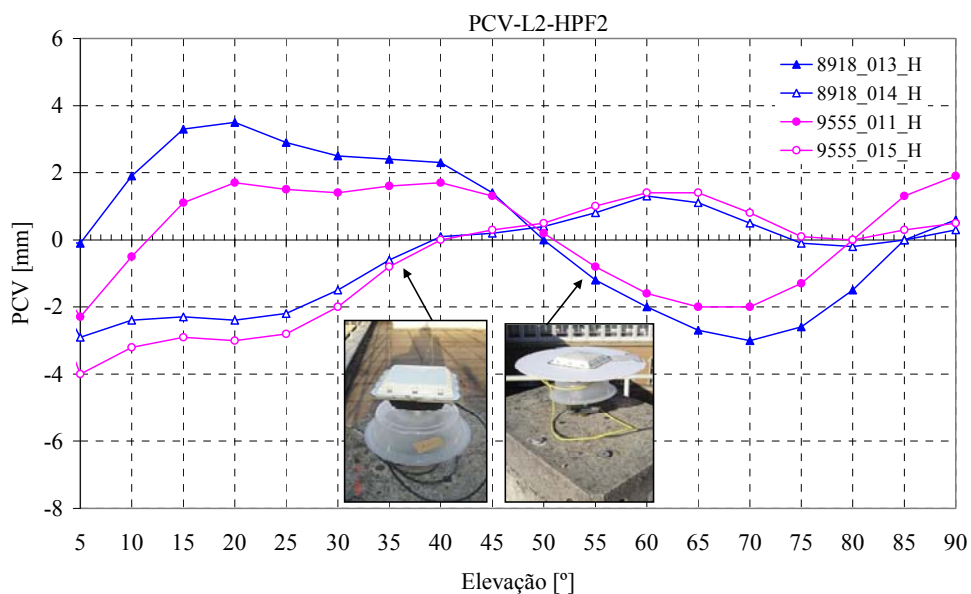


FIGURA 109—PCV NA PORTADORA L2 PARA DIFERENTES ARQUITETURAS, PILAR NPF2

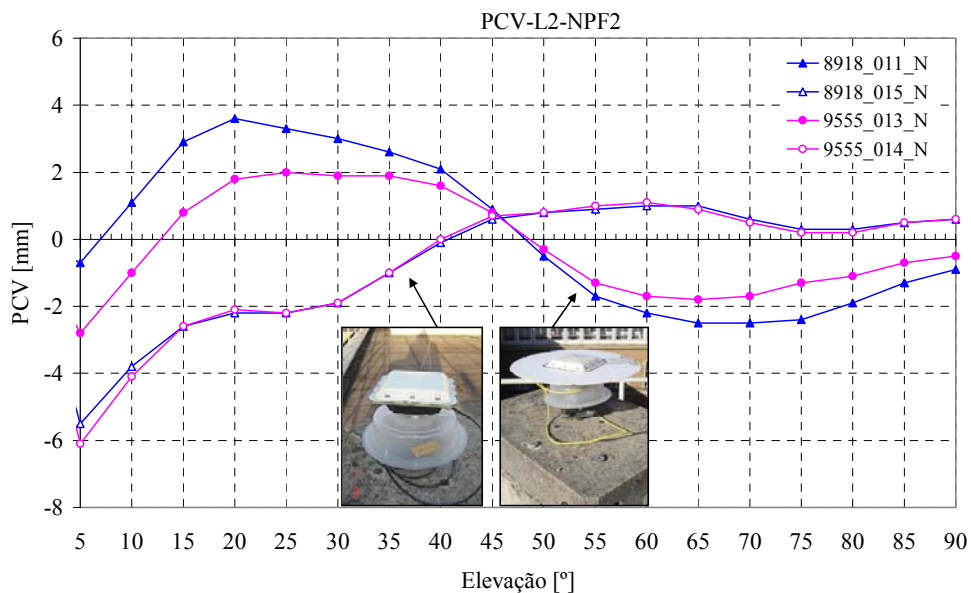


FIGURA 110–COMPONENTE VERTICAL DO PCO NAS PORTADORAS L1 E L2, ANTENA TRM22020.00 SN8918

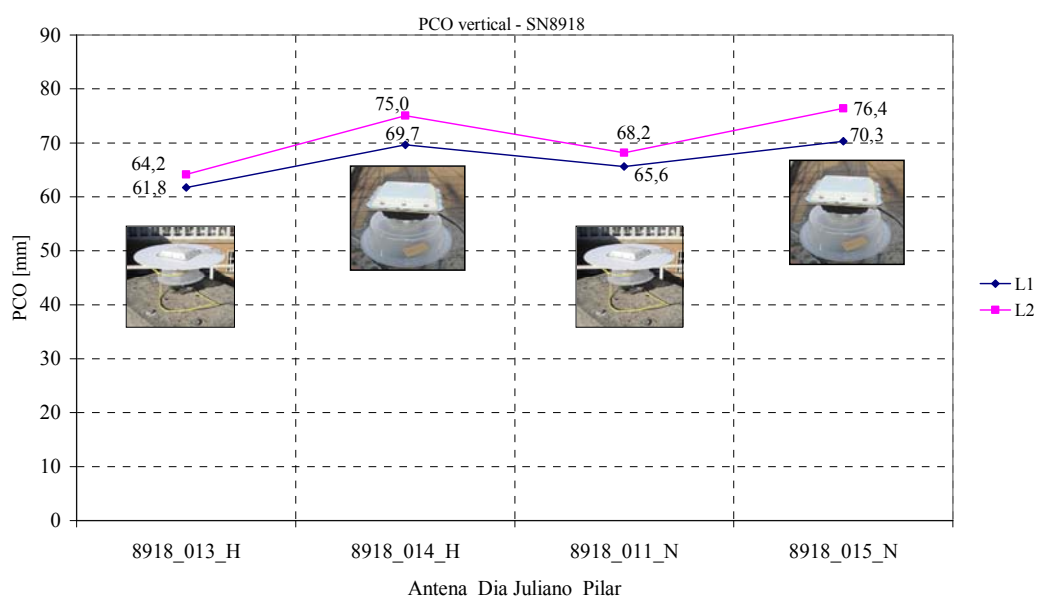
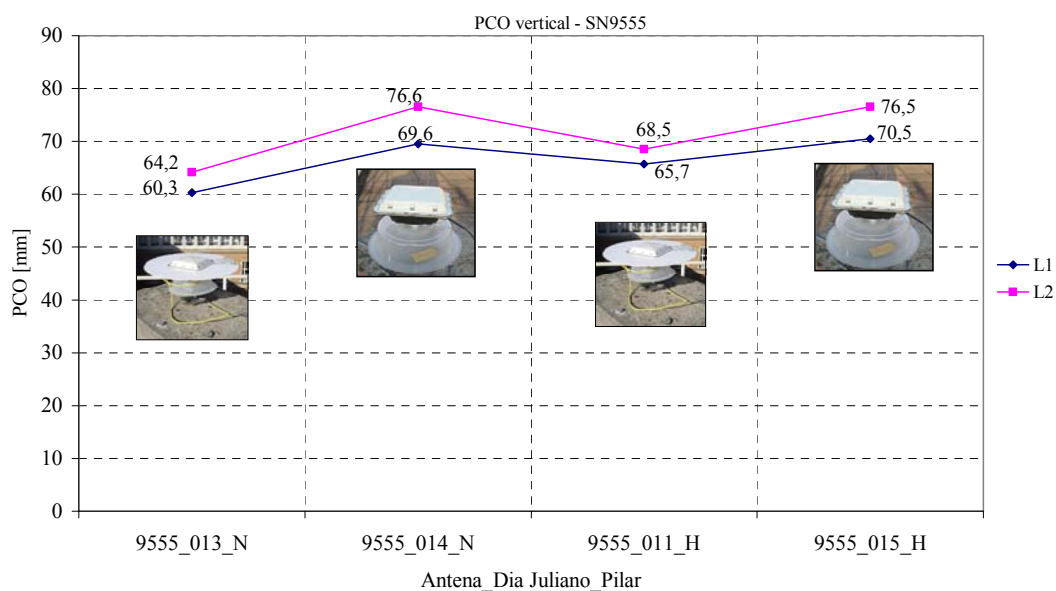


FIGURA 111–COMPONENTE VERTICAL DO PCO NAS PORTADORAS L1 E L2, ANTENA TRM22020.00 SN9555



Na figura 110 (SN8918) e na figura 111 (SN9555) estão plotadas as componentes verticais do PCO, determinadas no processo de calibração. Observa-se que as variações provindas da modificação das antenas são de até 1 cm na portadora  $L_1$  e acima de 1 cm na portadora  $L_2$ .



As mesmas análises foram realizadas com as componentes horizontais do PCO na portadora  $L_2$ . Analisando a figura 112 (antena SN8918) e a figura 113 (antena SN9555), pode-se afirmar que as diferenças ocasionadas nas componentes leste e norte provêm da alteração da arquitetura das antenas, e resultam cerca de dez vezes menores que as diferenças altimétricas. Conforme seção 2.2.3, são esperadas alterações de até 7 mm na componente vertical do PCO na portadora  $L_1$ , provindas da instalação de planos de terra em antenas modelo TRM22020.00–GP. Estas alterações, por sua vez, têm efeitos consideráveis nas PCV dependentes de elevação. No quadro 19 estão resumidos os valores das diferenças na componente vertical do PCO, provenientes da modificação da arquitetura (plano de terra) e do entorno da antenna (calibração em diferentes pilares, seção 4.3.1).

FIGURA 112—COMPONENTES HORIZONTAIS DO PCO NA PORTADORA  $L_2$ , ANTENA TRM22020.00 SN8918

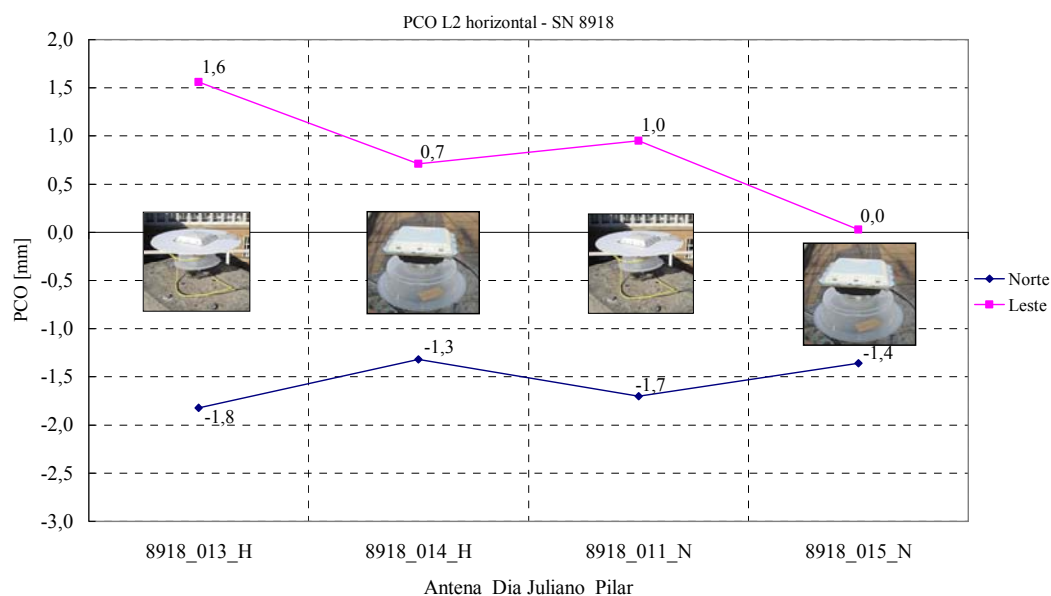
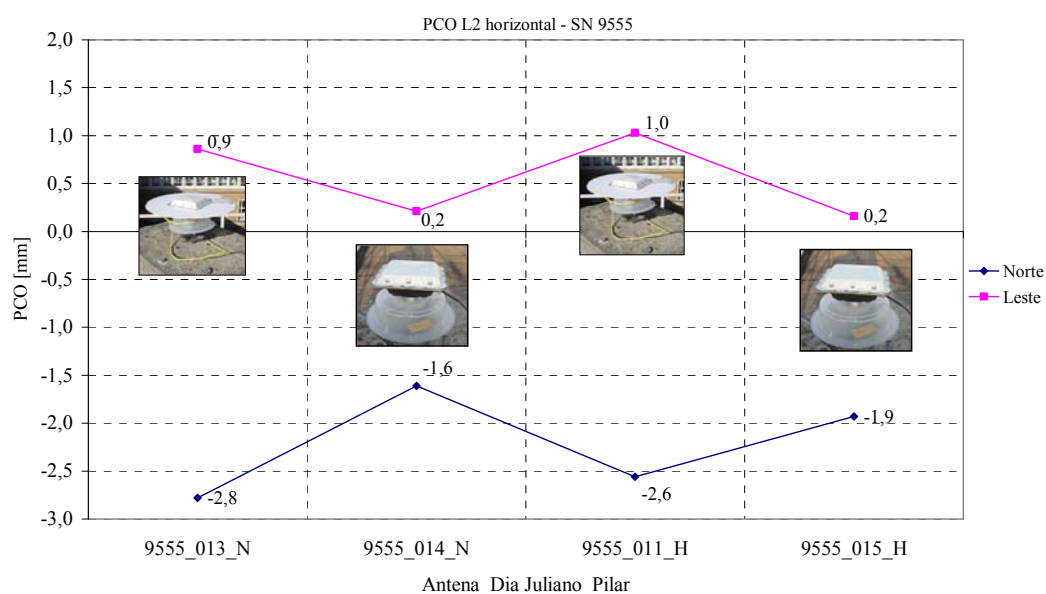




FIGURA 113–COMPONENTES HORIZONTAIS DO PCO NA PORTADORA L2, ANTENA TRM22020.00 SN9555



QUADRO 19 – DIFERENÇAS NA COMPONENTE VERTICAL DO PCO ANTE A MODIFICAÇÃO DA ARQUITETURA E DO ENTORNO DAS ANTENAS TRM22020.00

ANTENA	MODIFICAÇÃO	DIFERENÇAS VERTICAIS	
		L1	L2
SN9555	no plano de terra	1 cm	>1 cm
	de pilar	6 mm	5 mm
SN8919	no plano de terra	>1 cm	1 cm
	de pilar	4 mm	4 mm

As figuras seguintes apresentam as PCV dependentes de azimuth e elevação da antena SN8918 nas portadoras L<sub>1</sub> e L<sub>2</sub>. Estes resultados referem-se às ocupações no pilar NPF2 com a antena provida do plano de terra (figura 114) e com a antena desprovida deste elemento (figura 116).

FIGURA 114–PCV DEPENDENTE DE ELEVAÇÃO E AZIMUTE NA FREQUÊNCIA L1,  
ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR NPF2

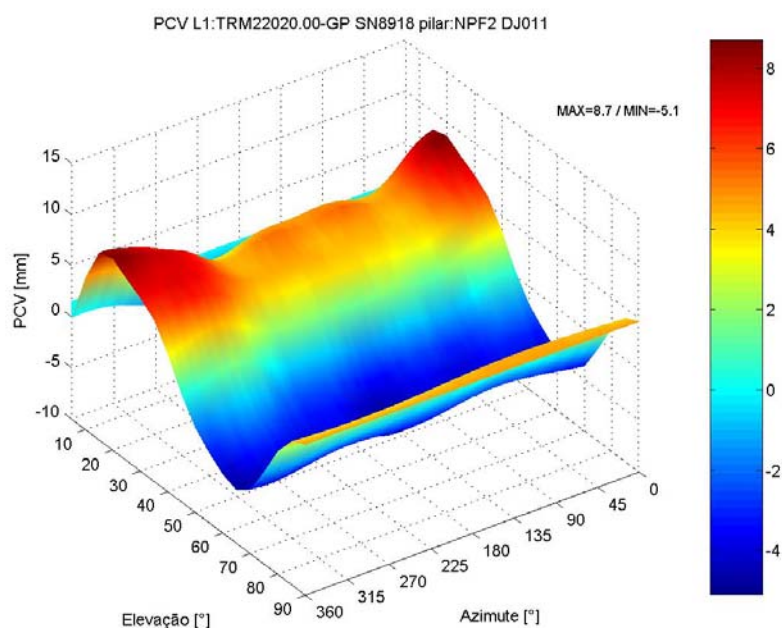


FIGURA 115–PCV DEPENDENTE DE ELEVAÇÃO E AZIMUTE NA FREQUÊNCIA L2,  
ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR NPF2

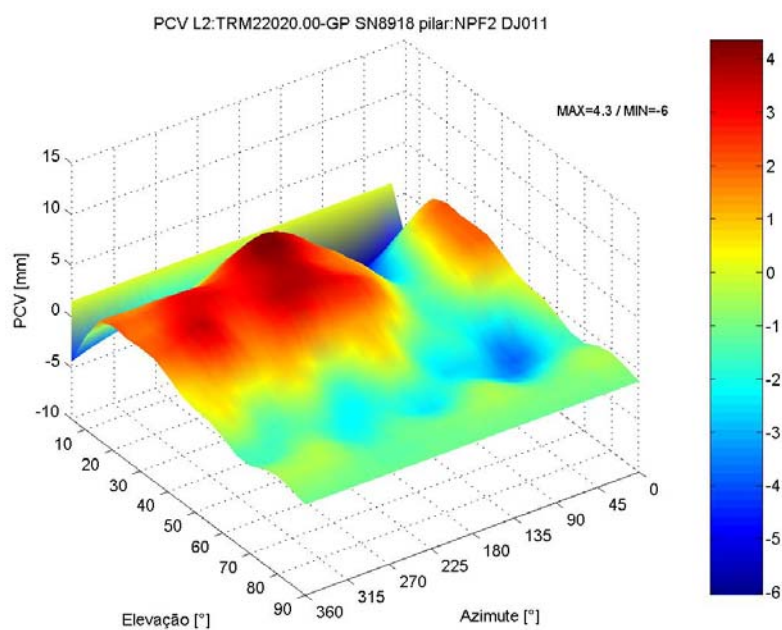


FIGURA 116–PCV DEPENDENTE DE ELEVAÇÃO E AZIMUTE NA FREQUÊNCIA L1,  
ANTENA TRM22020.00-GP SN8918, PILAR NPF2

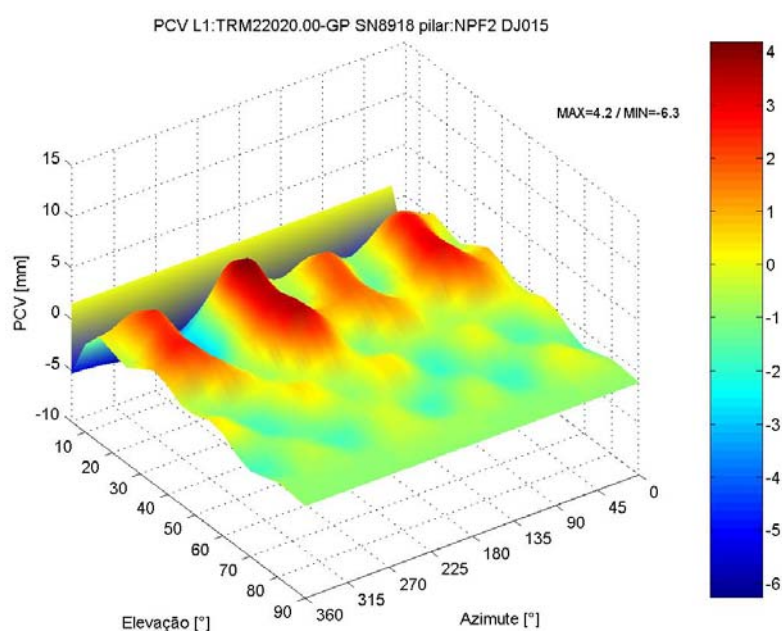
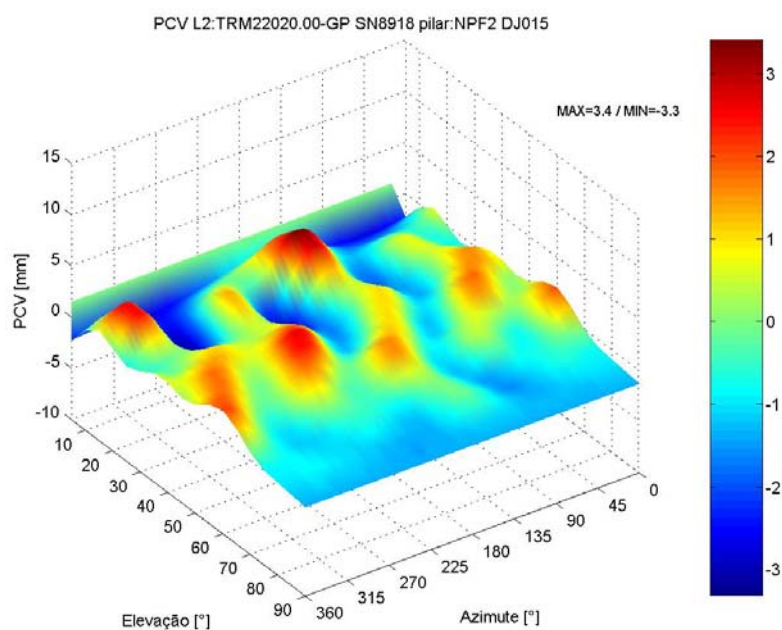


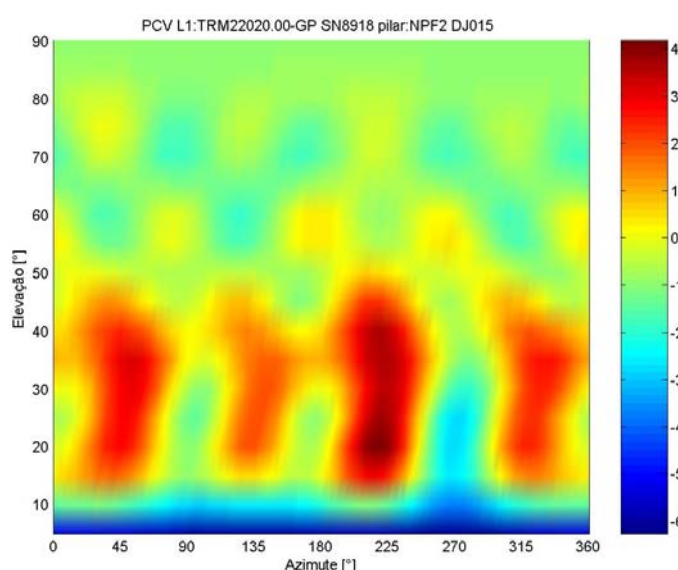
FIGURA 117– PCV DEPENDENTE DE ELEVAÇÃO E AZIMUTE NA FREQUÊNCIA L2,  
ANTENA TRM22020.00-GP SN8918, PILAR NPF2



Observa-se que no caso da ausência do plano de terra (figura 116) surge uma dependência em azimuth acompanhada de valores máximos (picos) nas regiões próximas a  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  e  $315^\circ$ . Estas informações foram representadas em um diagrama de fase plano (figura 118). Observa-se que as PCV reproduzem a resposta eletrônica da antena frente às suas características arquitetônicas, neste caso relacionadas aos cantos do invólucro do instrumento (figura 105, p. 137).

Esta característica da antena TRM22020.00+GP é também revelada na diferença entre os diagramas de fase provindos da calibração da antena em sua configuração original (i.e., com o plano de terra) em diferentes pilares. Trata-se da dominância em azimuth das variações do centro de fase em elevações próximas a  $15^\circ$ , em resposta aos quatro cantos do invólucro da antena conforme ilustrado na figura 105 (à direita). Esta característica imprime ao diagrama de fase de ambas as portadoras  $L_1$  e  $L_2$  o aspecto ilustrado na figura 99 (seção 4.3.1, p. 132) e na figura 100 (seção 4.3.1, p. 133), respectivamente, onde se evidenciam estas regiões assinaladas pelos respectivos valores máximos e mínimos, separadas por uma distância angular azimuthal de aproximadamente  $90^\circ$ .

FIGURA 118—PCV DEPENDENTE DE ELEVAÇÃO E AZIMUTE NA FREQUÊNCIA  $L_1$  (REPRESENTAÇÃO PLANA), ANTENA TRM22020.00-GP SN8918, PILAR NPF2



Na portadora  $L_1$ , observa-se que o valor máximo (5,1 mm) corresponde ao azimute aproximado de  $45^\circ$ , direção em que está situado o pino de conexão do cabo da antena ao receptor GPS (figura 99, seção 4.3.1). Isto indica que um outro aspecto construtivo da antena possa ter influenciado na forma do diagrama de fase.

Estudos realizados pelo *Institut für Erdmessung* mostram que alterações eletromagnéticas originadas da modificação da arquitetura da antena bem como da presença de objetivos vizinhos (e.g. base nivelante e superfície do pilar) influenciam as observações GPS bem como os resultados de calibração. Constata-se que as características de recepção das antenas foram alteradas em ambas as portadoras nas medições realizadas com a antena desprovida do plano de terra.

#### 4.3.3 Influências de Outros Detalhes Construtivos da Antena

Os resultados da calibração realizada com uma antena TRM5800 (figura 34, seção 3.2.1) mostraram que as saliências da superfície do invólucro superior do instrumento causam efeito similar ao verificado na antena TRM22020.00-GP. Este efeito é evidenciado na portadora  $L_2$  (figura 119, figura 120), onde se observam cinco picos nas elevações próximas a  $60^\circ$ . Os valores máximos e mínimos, de 4,1 mm, são registrados nas elevações inferiores a  $30^\circ$ .

O efeito da arquitetura da antena nas PCV pode advir também dos componentes laterais do instrumento, e.g., painéis de interface, conexões e demais detalhes construtivos. A figura 121 exibe o diagrama das PCV na portadora  $L_2$  da antena TRM4800 SN4859, calibrada no pilar HPF1 (figura 33, seção 3.2.1).

FIGURA 119–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2,  
ANTENA TRM5800 SN5278, PILAR HPF2

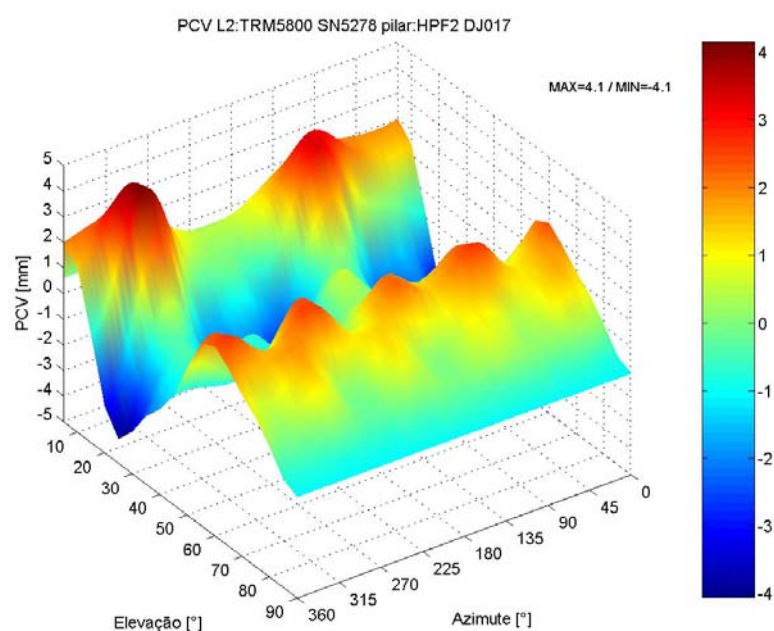


FIGURA 120–PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L2,  
ANTENA TRM5800 SN5278, PILAR HPF2 (REPRESENTAÇÃO PLANA)

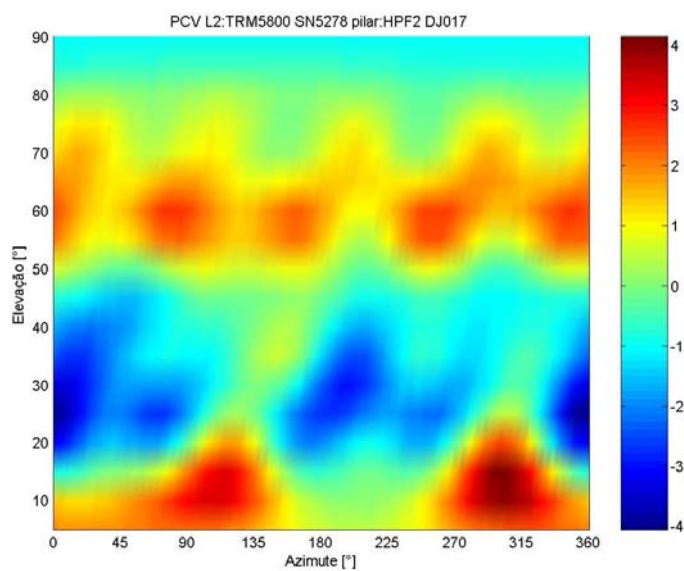
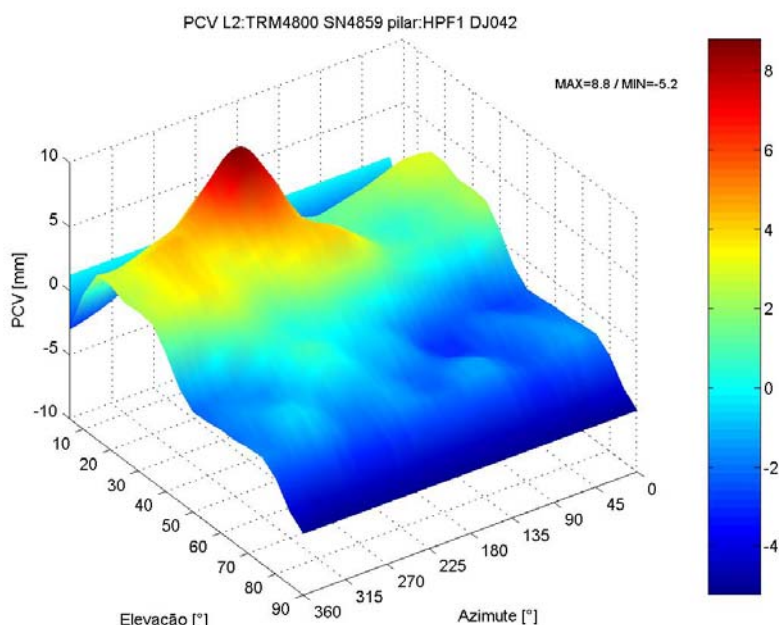




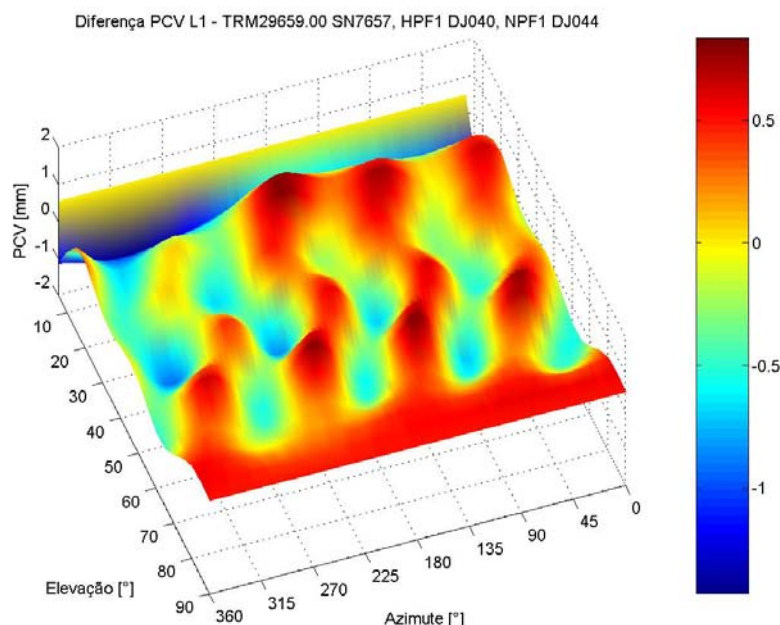
FIGURA 121– PCV DEPENDENTE DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO NA PORTADORA L1,  
ANTENA TRM4800 SN4859, PILAR HPF1



Observa-se que o pico de 8,8 mm está orientado no azimuth aproximado de 225°, podendo estar associado a uma influência do painel de conectores situado na parte inferior do instrumento. Este painel foi orientado nesta mesma direção na ocasião da calibração da antena. Contudo, nota-se que esta influência ocorre apenas na portadora L<sub>2</sub>, podendo ser ocasionada também por fatores intrínsecos ao comportamento deste modelo de antena.

Outro exemplo é o caso da calibração da antena TRM29659.00+GP SN7657 (*choke ring*) nos pilares HPF1 e NPF1 (figura 101), mostrado na seção 4.3.1. Observa-se que as diferenças predominantes, próximas a 1 mm, têm dominância nas duas direções (azimuth e elevação), se apresentando de forma singular e uniforme se comparadas às respostas das antenas TRM22020.00+GP. As diferenças definem quatro curvas em trajeto de aspecto sinuoso e ao mesmo tempo simétrico nas elevações entre 10° e 70° (figura 122). É provável que o aspecto do diagrama de fase esteja associado à influência dos quatro anéis metálicos concêntricos, dispostos equidistantes, que constituem o dispositivo *choke ring* das antenas AOAD/M\_T.

FIGURA 122– DIFERENÇAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO ENTRE PILARES HPF1 E NPF1 NA PORTADORA L1, ANTENA TRM29659.00 SN7657 (*CHOKE RING*)



Conforme verificado nas seções 4.1.2 e 4.1.4, antenas de mesmo modelo podem mostrar diferentes comportamentos do centro de fase ainda que sejam antenas iguais e calibradas no mesmo pilar. Observa-se que as PCV da antena TRM22020.00 SN9555 (figura 95, p. 130) diferem dos correspondentes valores referentes à antena SN5816, de mesmo modelo, principalmente nas elevações de até 45° (figura 65, p. 108). Estas diferenças podem estar associadas a detalhes de natureza construtiva da antena, ou mesmo a influências externas, e.g., o efeito de multicaminho dos sinais.

Com as análises apresentadas, mostrou-se a importância do tratamento individual de antenas GPS no sentido de avaliar a resposta eletrônica desses instrumentos através da análise do diagrama de fase. A representação da diferença entre PCV obtidas a partir da calibração em diferentes pilares pode ser uma ferramenta de interpretação do comportamento do centro de fase frente às alterações do entorno da antena. Estas análises são tratadas com mais detalhes nas seções seguintes.



#### 4.3.4 Análise do Efeito de multicaminho

O efeito de multicaminho é uma fonte de erro no posicionamento preciso com o GPS (seção 2.1.4.3). O multicaminho é uma função das características de reflexão dos sinais que atuam na região circunvizinha da antena do receptor. Na calibração de antenas GPS podem ser enumerados um conjunto de fatores que influenciam a precisão das medições, sendo um deles o multicaminho dos sinais nas observações.

Se a antena permanece em uma mesma posição sem que haja alteração do seu entorno, os erros provenientes do efeito de multicaminho são dependentes apenas do ângulo de incidência do sinal, e portanto da elevação e azimute dos satélites. Nessas condições pode-se realizar a detecção e localização das influências do efeito de multicaminho por meio de técnicas especiais. Um algoritmo implementado no programa WaSoft/Multipath (seção 3.2.3.3) permite a execução destas tarefas por meio do cálculo de correlação entre estações pertencentes a uma rede de estações.

No presente estudo foram empregadas as observações de quatro estações de referência permanentes pertencentes à rede SAPOS (seção 1.1): 0385 (Karlsruhe), 0386 (Heilbronn), 0387 (Heidelberg) e 0388 (Iffezheim). A influência do efeito de multicaminho na localidade das estações do GIK foi examinada através de redes independentes compostas pelas estações HPF2 e NPF2 e HPF1 e pelas quatro estações da rede SAPOS supracitadas.

No GIK, as medições foram conduzidas nos pilares HPF1, HPF2 (superfície com dimensões 0,60 x 0,80 m) e NPF2 (0,55 x 0,55 m) empregando duas antenas TRM22020.00+GP (SN8918 e SN9555) e dois receptores Trimble 4000SSI (quadro 14, seção 3.4). Para simular alterações do entorno da estação, cada antena foi instalada em adaptadores com diferentes comprimentos, que proporcionaram diferentes alturas do ARP da antena em relação à superfície do pilar. Na figura 123 está representado o adaptador longo, que mede 35 cm (denominado SFB) e na figura 124 o adaptador curto, que mede 3 cm (denominado adaptador curto).

FIGURA 123–CONSTRUÇÃO ELEVADA COM ADAPTADOR SFB



FIGURA 124–CONSTRUÇÃO BAIXA COM ADAPTADOR CURTO



A figura 125 ilustra os resultados da detecção e localização do multicaminho (seção 3.2.3.3) no pilar HPF1 na ocasião do emprego do adaptador curto (quadro 14, medição nº 84). Observa-se que a maior intensidade (15 mm) é verificada no intervalo de 10° a 25° de elevação, e acima de 40° ocorre redução da intensidade do efeito de multicaminho.

A figura 126 é referente ao mesmo pilar, com emprego do adaptador longo (medição nº 82). Se comparada à primeira análise (figura 125), observa-se considerável redução da intensidade do efeito de multicaminho e maior quantidade de observações com intensidades (RMS) inferiores a 5 mm.

No pilar HPF2 (medições nº 77 e 81), também houve redução da intensidade do multicaminho quando do emprego do adaptador longo (figura 128), se comparado aos resultados mostrado na figura 127. A dominância azimutal dos sinais refletidos é constatada, por exemplo, próximo aos azimutes 50°, 200° e 300°.

FIGURA 125–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO,  
ADAPTADOR CURTO, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR HPF1

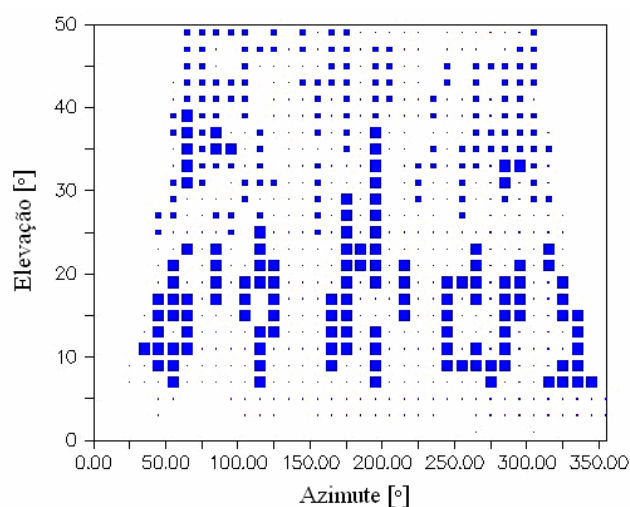
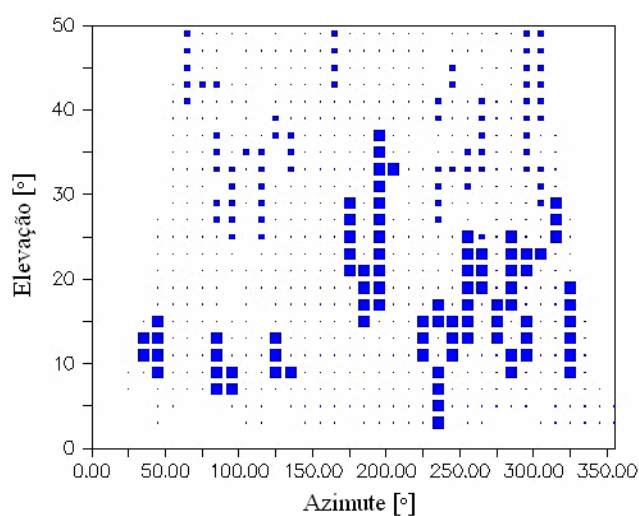


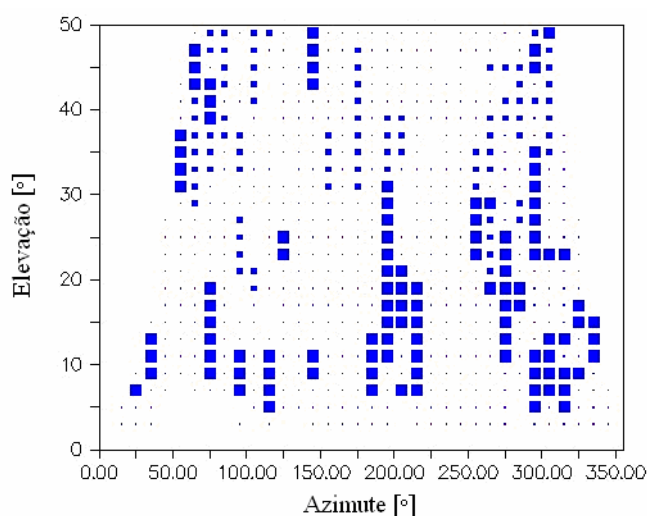
FIGURA 126–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO,  
ADAPTADOR LONGO, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR HPF1



Conforme WANNINGER (2003), o azimuth e a elevação representados nos gráficos referem-se aos ângulos de incidência do sinal afetado e não à direção dos possíveis refletores. Como acontece normalmente nas estações de referência, os refletores se situam na direção do satélite envolvido, contudo abaixo do horizonte da antena. Na região dos azimutes em questão, verifica-se a presença de edifícios próximos que podem ter ocasionado reflexão dos sinais. No pilar NPF2, observa-se

que houve considerável influência do efeito de multicaminho empregando tanto o adaptador curto (figura 129, medição nº87) como o adaptador longo (figura 130, medição nº90) com sensível redução da intensidade para o emprego do adaptador longo.

FIGURA 127–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO, ADAPTADOR CURTO, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR HPF2



Observa-se que a configuração de adaptadores está associada a diferentes intensidades do efeito de multicaminho. Algumas estações apresentam baixa influência e outras são afetadas com mais intensidade. A qualidade dos dados provenientes da ocupação nos pilares HPF1 e HPF2 são similares considerando a influência do efeito de multicaminho, para a qual o pilar HFP2 (0,60 x 0,80 m) apresenta resposta constante e o pilar NPF2 (0,55 x 0,55 m) é mais afetado.

FIGURA 128–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO,  
ADAPTADOR LONGO, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR HPF2

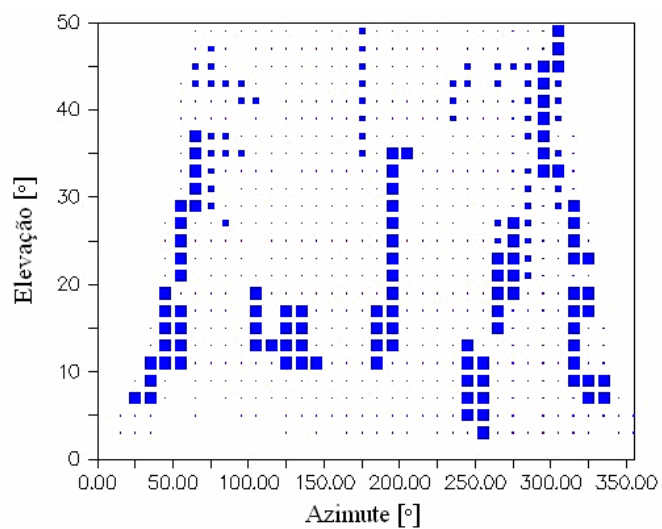


FIGURA 129–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO,  
ADAPTADOR CURTO, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR NPF2

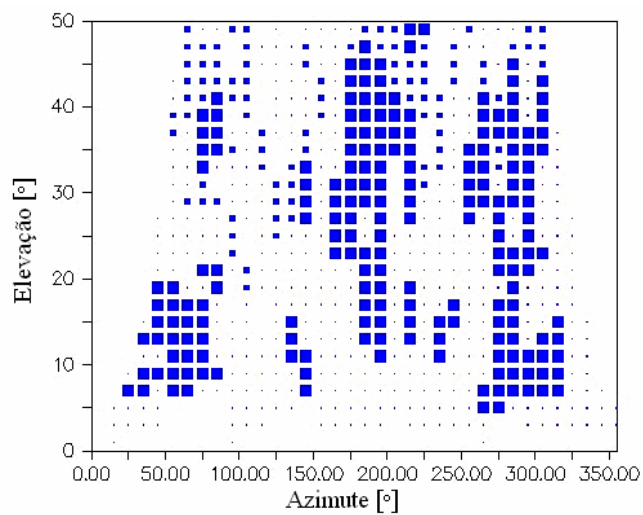
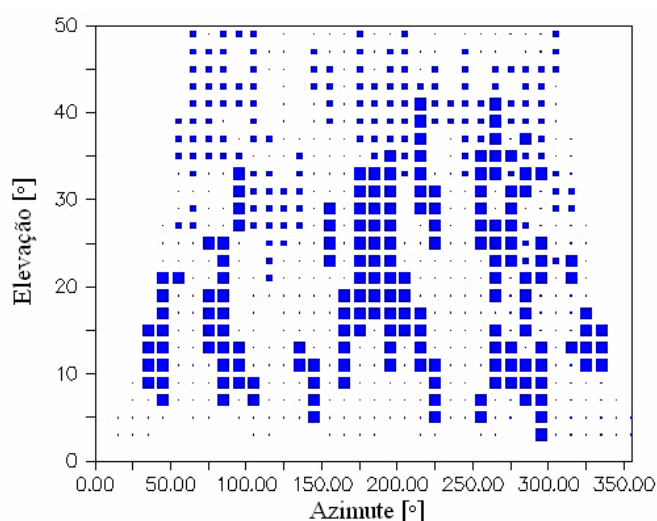


FIGURA 130–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO,  
ADAPTADOR LONGO, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR NPF2



#### 4.3.5 Considerações Sobre a Razão Sinal-Ruído (SNR)

Conforme exposto na seção 2.1.4.3, os valores da SNR têm sido introduzidos como um indicador de qualidade das observações GPS e empregados no desenvolvimento de modelos para a redução do efeito de multicaminho.

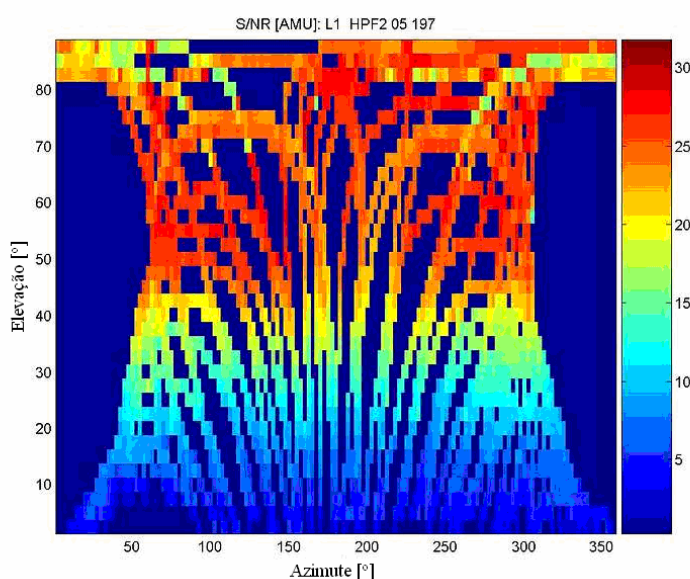
Conforme exposto na seção 3.4, adotou-se um método de análise da qualidade do sinal GPS baseado na modificação do cenário da estação de rastreo. Os valores da SNR, fornecidos pelo receptor GPS, foram lidos do arquivo de observações RINEX (seção 3.2.3) por uma rotina construída no programa MATLAB, a qual é capaz de gerar representações da SNR em função do azimute e elevação dos satélites nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$ .

Nestas representações, os ângulos de elevação e azimute são dados com resolução de  $2,5^\circ$ , sendo que os valores da SNR são representados pela média aritmética correspondente a intervalos de  $2^\circ$  em azimute e elevação. O valor médio referente a este intervalo é representado por uma coloração que corresponde a uma determinada escala, neste caso dada em AMU (ingl. *Arbitrary Manufacturer Unity*). Os gráficos também podem ser plotados com os valores normalizados. Na seqüência,

são mostradas as análises dos valores da SNR referentes às observações com emprego da antena TRM22020.00+GP (SN8918).

A figura 131 ilustra os valores da SNR ao longo do hemisfério da antena para a ocupação no pilar HPF2, emprego do adaptador curto (figura 124) e cabo de antena de 30 m (quadro 14, medição nº 79). A figura 132 ilustra os valores da SNR para as mesmas condições de entorno, mas empregando o cabo de 10 metros de comprimento (medição nº 81). Observa-se que em ambos os casos os valores da SNR mais altos são os provindos de satélites de altas elevações (seção 2.1.4.3). Pela comparação entre as duas figuras pode-se afirmar que a qualidade dos sinais provindos dos satélites situados acima de 50° de elevação é melhor no primeiro caso.

FIGURA 131—OBSERVAÇÕES DO DIA 16/07/2005, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR HPF2, ADAPTADOR CURTO, CABO 30 METROS



Os resultados da ocupação no pilar HPF2 com emprego de adaptador longo são mostrados na figura 133. Neste caso, a qualidade dos sinais permanece constante em elevações superiores a 50°, enquanto que, com o emprego do adaptador curto (figura 132), há uma redução considerável da qualidade dos sinais (e.g., de 30 para 15 AMU) de alguns satélites acima de 70° de elevação.

FIGURA 132—OBSERVAÇÕES DO DIA 17/07/2005, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918,  
PILAR HPF2, ADAPTADOR CURTO, CABO 10 METROS

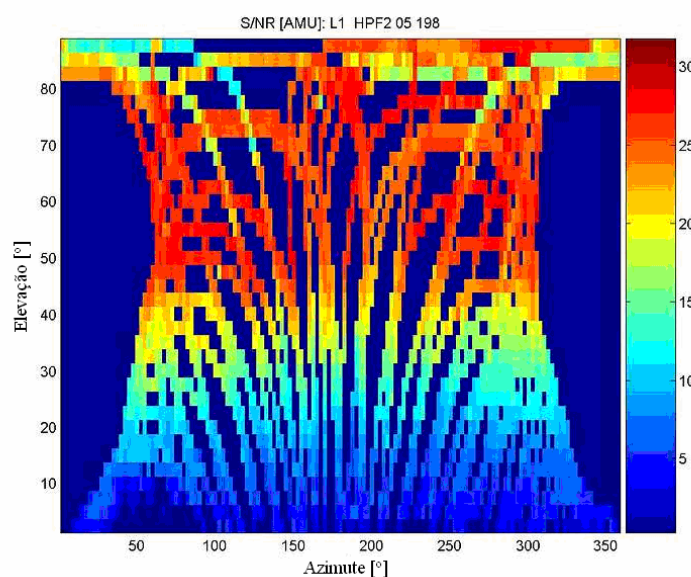
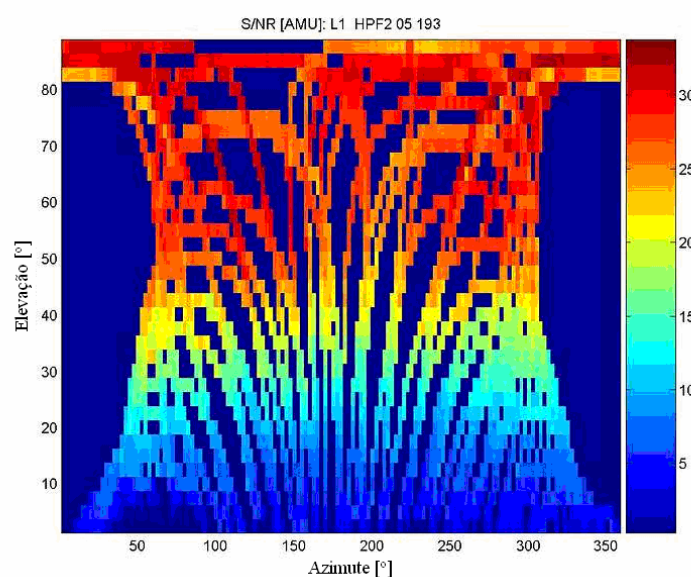


FIGURA 133—OBSERVAÇÕES DO DIA 13/07/2005, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918,  
PILAR HPF2, ADAPTADOR LONGO, CABO 30 METROS

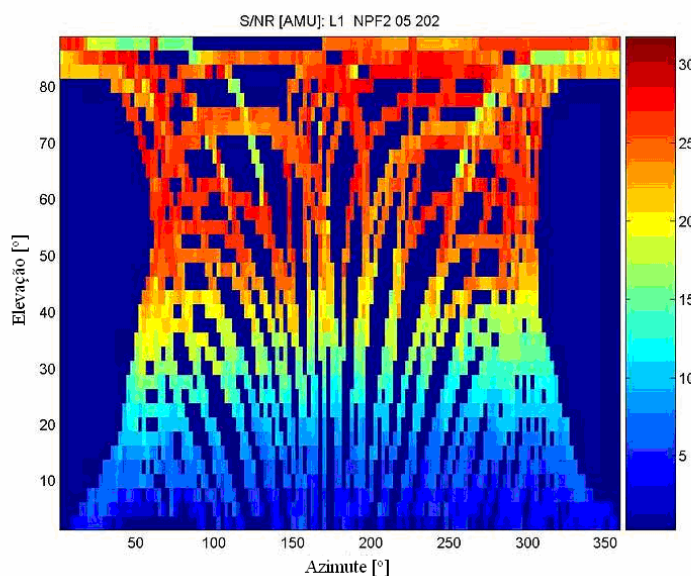


Na figura 134 está representado o resultado das medições conduzidas com a mesma configuração de antena, adaptador, cabo e receptor, mas ocupando um pilar diferente (NPF2) para caracterizar a alteração do entorno da estação. Observa-se que



houve perda da qualidade do sinal de alguns satélites das medições no pilar NPF2, provavelmente em virtude do efeito de multicaminho (seção 4.3.4).

FIGURA 134—OBSERVAÇÕES DO DIA 21/07/2005, ANTENA TRM22020.00+GP SN8918, PILAR NPF2, ADAPTADOR LONGO, CABO 30 METROS

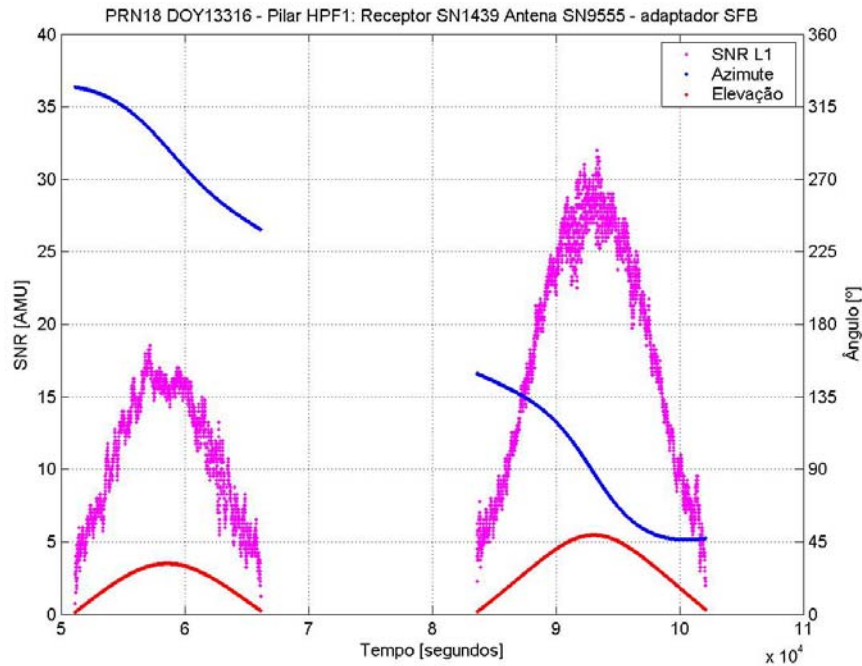


A qualidade dos sinais incidentes na antena GPS depende do ângulo de elevação dos satélites (seção 2.1.4.3). Verifica-se que a dependência do local de calibração se pronuncia de forma diferente na análise dos valores da SNR quando a antena é instalada em diferentes alturas. Os experimentos mostraram que a ocupação em diferentes pilares bem como o emprego de diferentes adaptadores ocasionam alterações na qualidade do sinal, e podem estar associadas ao efeito de multicaminho (seção 4.3.4).

Em uma segunda etapa da análise dos valores da SNR, objetivou-se verificar o comportamento desta grandeza por meio de diagramas individuais. A figura 135 exemplifica esta representação para os dados do satélite PRN18. Os valores da SNR são dados em função da posição do satélite (azimute e elevação) em relação ao pilar HPF1. Nestas medições, foi empregada a antena SN9555 com o receptor SN1439, instalada no pilar em um adaptador longo (quadro 14, medição nº 78). Observa-se que

os valores da SNR assumem valores máximos (cerca de 33 AMU) para o satélite posicionado em elevação de aproximadamente 45° e azimuth aproximado de 90°.

FIGURA 135–REPRESENTAÇÃO DA RAZÃO SINAL-RUÍDO (SNR)



A relação entre a SNR de dois conjuntos de dados de diferentes cenários pode identificar o grau de influência de cada elemento que constitui o entorno da estação. Uma medida comum da relação entre duas grandezas amostrais  $X$  e  $Y$  é a covariância, dada por (GEMAEL, 1994, p. 41; MONTGOMERY e RUNGER, 2003, p. 115):

$$\sigma_{XY} = E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)] = E(XY) - \mu_X \mu_Y, \quad (4.6)$$

onde  $E(XY)$  é a esperança matemática do produto das grandezas amostrais  $X$  e  $Y$ ,  $\mu_X = E(X)$  e  $\mu_Y = E(Y)$ . A correlação entre  $X$  e  $Y$ , denotada por  $\rho_{XY}$  é dada por:

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}, \quad (4.7)$$

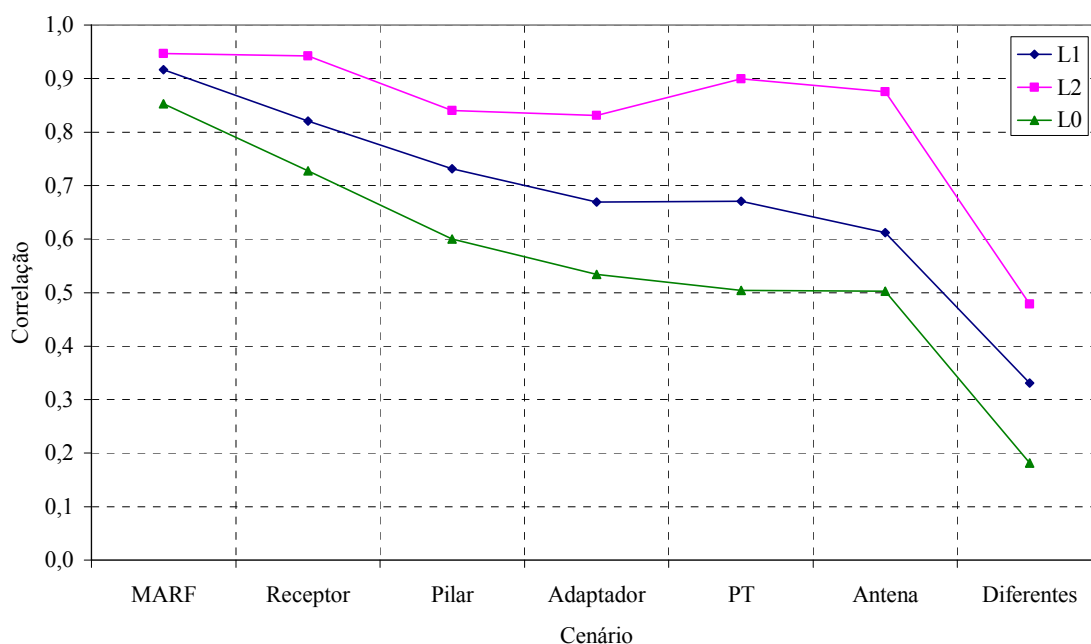
com  $-1 \leq \rho_{XY} \leq 1$ , onde  $\sigma_X^2$  e  $\sigma_Y^2$  são as variâncias de  $X$  e  $Y$ , respectivamente.

A correlação é uma quantidade adimensional que pode ser usada para comparar as relações lineares entre pares de variáveis em diferentes unidades. Duas variáveis aleatórias com correlação não zero são ditas estar correlacionadas. Similar à covariância, a correlação é uma medida da relação linear entre as variáveis, porém é uma medida padronizada.

A fim de investigar a associação entre pares de medições realizadas em diferentes cenários, foi calculada a correlação dos valores da SNR. As análises foram estruturadas conforme um planejamento de configurações, que foi viabilizado mediante as diferentes combinações entre receptores, antenas, adaptadores e pilares (apêndice 5). Calculou-se o coeficiente de correlação da SNR de cada satélite para todas as seções indicadas neste planejamento. Considerou-se a média aritmética destes coeficientes para a obtenção de um valor representativo de cada cenário. Na figura 136, os cenários estão indicados no eixo horizontal, dispostos em ordem decrescente de correlação na portadora  $L_1$  e na combinação linear  $L_0$ . No eixo vertical estão indicados os correspondentes valores médios da correlação nas portadoras  $L_1$ ,  $L_2$  e na combinação linear  $L_0$ .

Uma das seções foi realizada com uma placa de material absorvente de microondas (MARF) colocada sobre a superfície do pilar (medição nº 98, quadro 14). No dia seguinte, a medição foi novamente realizada para a mesma configuração de equipamentos, contudo sem o MARF (medição nº 99, quadro 14). Observa-se que os dados do cenário MARF apresentam as maiores correspondências, principalmente na portadora  $L_2$ , em que a correlação é próxima a 1 (100%). Em tal caso, admite-se que a estação de rastreamento não sofreu modificação considerável em seu entorno mediante a colocação de um material absorvente de rádio-frequência na superfície do pilar.

FIGURA 136—COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DA RAZÃO SINAL-RUÍDO



As correlações entre 0,5 e 0,7 para os cenários adaptador, plano de terra (PT) e antena indica que a influência destes elementos na qualidade do sinal é similar considerando a portadora  $L_1$  e a combinação linear  $L_0$ . Os maiores valores de correlação da SNR foram obtidos na portadora  $L_2$  (acima de 0,8) indicando que esta portadora foi menos afetada ante as modificações de cenário. As menores correlações resultaram dos dados provenientes de cenários diferentes, em que todo o entorno da estação foi modificado.

A rotina em MATLAB, desenvolvida para este cálculo de correlação, executa a leitura de uma série de valores da SNR a partir do arquivo de observações RINEX considerando como valor de partida o correspondente ao ângulo máximo de elevação dos satélites. Assim, a correlação dos valores da SNR é válida apenas para os sinais gerados quando os satélites estão situados nas máximas elevações. Sinais gerados nas demais elevações (elevações inferiores) foram desconsiderados.

## **5 ESTABELECIMENTO DA PRIMEIRA ESTAÇÃO DE CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GNSS NO BRASIL**

Um dos principais objetivos deste trabalho (conforme seção 1.4) é introduzir um método de calibração de antenas de receptores GPS, ainda inexistente no Brasil. Os primeiros estudos foram orientados em quatro etapas.

Inicialmente, buscou-se encontrar um local para o estabelecimento da estação, fase que envolveu o estudo de viabilidade do projeto. A segunda etapa tratou da construção dos pilares de calibração conforme os padrões prescritos na normatização brasileira e na experiência adquirida na Alemanha. Na terceira etapa foram realizadas medições GPS visando a análise do entorno da estação, que inclui a detecção, localização e quantificação da influência do efeito de multicaminho nas observações. Na quarta etapa, dados de correção de calibração de duas antenas GPS geodésicas foram introduzidos nestas medições a fim de avaliar os primeiros resultados do emprego destes dados no posicionamento geodésico.

### **5.1 LOCALIZAÇÃO E VIABILIDADE**

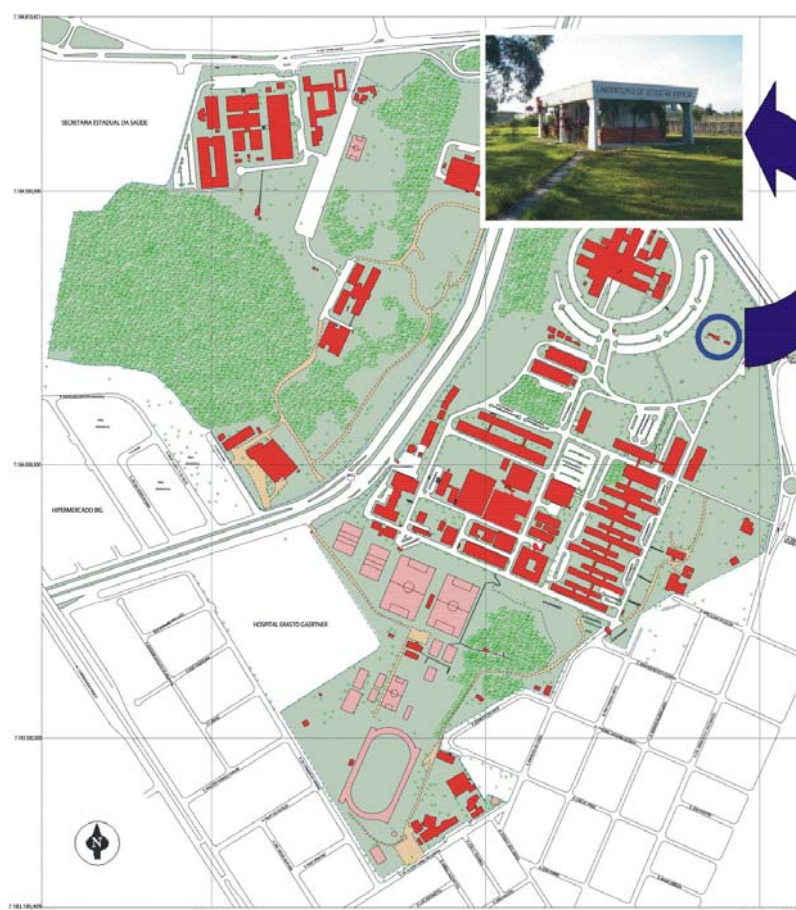
O primeiro passo consistiu do estudo de um local, no campus do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (figura 137) que agregasse particularidades técnicas de fundamental importância para a realização de levantamentos geodésicos por GPS. Tais detalhes são a proximidade dos laboratórios e da sala de equipamentos e a disponibilidade de instalações com provimento de energia elétrica.

O Observatório Astronômico Camil Gamael foi inaugurado em 1992 no Centro Politécnico para a realização de pesquisas em diversas áreas da Astronomia. Anexo a este observatório, foi edificado um auditório destinado às atividades de ensino, pesquisa e processamento de dados. Sua cobertura é composta por uma laje, configurada por uma lâmina horizontal em concreto armado, que pode ser acessada através da cobertura do observatório, a qual é composta por uma estrutura metálica que pode ser deslocada lateralmente para permitir a realização de observações

astronômicas. Inaugurado em meados de 2004, o edifício composto pelo observatório astronômico Camil Gemael e o auditório anexo pode ser visualizado na figura 138 (à direita).

Na figura 138 visualiza-se, à esquerda, o Laboratório de Geodésia Espacial (LAGE), que encerra as atividades de levantamentos geodésicos e marinhos e processamento de dados GNSS, abrangendo a estação PARA, pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Na parte inferior e à direita desta figura visualiza-se o marco PARA.

FIGURA 137–CAMPUS DO CENTRO POLITÉCNICO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. DETALHE: LABORATÓRIO DE GEODÉSIA ESPACIAL (LAGE).



Fonte: SLUTTER et al. (2001).

Nota: Modificado pelo autor.

FIGURA 138–LABORATÓRIO DE GEODÉSIA ESPACIAL (ESQUERDA) E OBSERVATÓRIO ASTRONÔMICO COM AUDITÓRIO ANEXO (DIREITA)



Em vista das condições de acessibilidade e à infraestrutura oferecida ao projeto proposto, foi realizado um estudo de viabilidade do projeto levando em consideração as características estruturais da edificação e os custos da obra. Na figura 139 observa-se a situação da cobertura do auditório antes da edificação dos pilares geodésicos, os quais irão compor a 1ª Base de Calibração de antenas GNSS. A parte elevada compõe a cobertura móvel do observatório astronômico. As setas indicam os locais onde foram edificados os dois primeiros pilares.

FIGURA 139–LAJE DE COBERTURA DO AUDITÓRIO

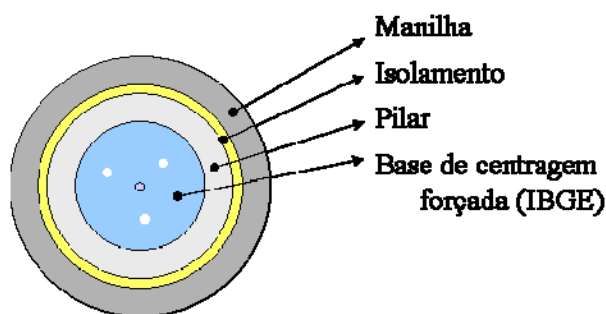




## 5.2 CONSTRUÇÃO DOS PILARES DE CALIBRAÇÃO

A determinação precisa e confiável das características do centro de fase de antenas GPS pela calibração relativa somente é possível com o emprego de pilares de calibração posicionados em locais onde seja evitada a influência do efeito de multicaminho. O modelo de pilares adotado para esta finalidade foi baseado no exemplo de pilares que constituem parte da rede geodésica do Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (TH). Eles são construídos em concreto armado com altura mínima de 1,50 m da base do bloco. O perfil circular contribui para evitar a presença de cantos que possam ocasionar o efeito de multicaminho, como é o caso dos pilares de perfil quadrangular. A figura 140 exibe o corte transversal dos pilares de calibração.

FIGURA 140–CORTE TRANSVERSAL DOS PILARES DE CALIBRAÇÃO



Os pilares são providos de uma base de centragem forçada, fixada em sua superfície. Ela é composta de uma plataforma circular metálica na qual é fixado um parafuso central conforme as instruções prescritas pelo IBGE para a execução dos marcos e pilares que compõem o Sistema Geodésico Brasileiro (IBGE, 2006). Elas foram elaboradas com o objetivo de fornecer subsídios para as etapas de construção, manutenção, e reparo dos mesmos. Neste trabalho, a construção dos pilares foi conduzida conforme estas normas, salvo algumas adaptações que se fizeram necessárias, dentre elas, o provimento de proteção termo-mecânica. Foram previstos pontos nivelíticos para controlar o movimento vertical do fundamento do edifício antes e após a obra, bem com o passar do tempo. Esta monitoração será exposta na seção 5.3. A figura 141 mostra o pilar denominado 1000, situado a Oeste do laboratório astronômico.



FIGURA 141–PILAR DE CALIBRAÇÃO (PILAR 1000 – OESTE)



### 5.3 MONITORAÇÃO NIVELÍTICA DA ESTRUTURA DA 1ªBCALBR

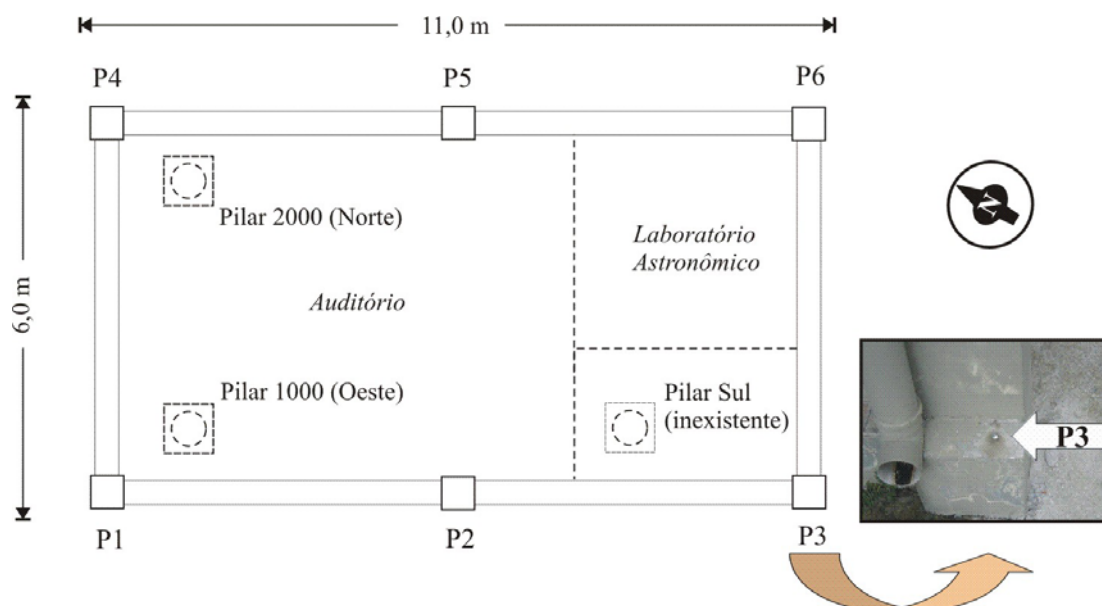
Foram realizados dois nivelamentos da estrutura sobre a qual foram construídos os dois primeiros pilares da 1ªBCALBR: um antes do início das obras, em 21/08/2006, e o segundo nivelamento em 10/10/2006, um mês e quinze dias após a conclusão da construção dos pilares.

Os pontos de controle de nível (P1 a P6) foram materializados por pinos metálicos, introduzidos nos seis blocos da fundação do edifício conforme lustra a figura 112<sup>25</sup>.

---

<sup>25</sup> Indicado na figura está o pilar Sul, ainda inexistente (ver capítulo 6, recomendações).

FIGURA 142–PONTO DE CONTROLE DE NÍVEL



Procedeu-se o nivelamento pelo método de visadas iguais visando a eliminação dos erros provocados pelo não paralelismo entre o eixo de colimação e o eixo do nível tubular do aparelho, pela refração atmosférica e pela curvatura terrestre (FAGGION e FREITAS, 1998). Empregou-se um nível digital Leica NA3003, com precisão de 0,4 mm/km no duplo nivelamento. O nivelamento partiu de três referências de nível, que são os marcos RM1, RM2 e RM3, excêntricos à estação PARA e localizados na proximidade do laboratório astronômico.

Os resultados apresentados no quadro 20 são as diferenças dos desníveis determinados nos dois nivelamentos em relação aos três marcos excêntricos:

$$\xi = \Delta_1 - \Delta_2, \quad (5.1)$$

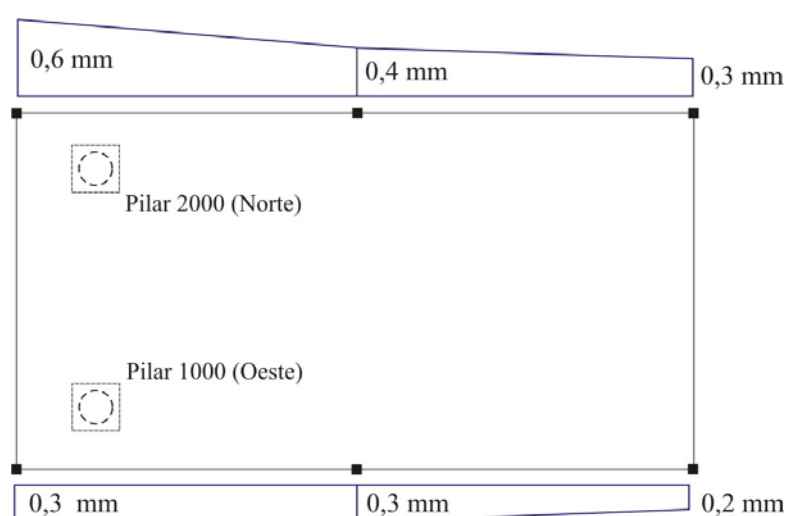
onde  $\Delta_1$  e  $\Delta_2$  são os desníveis antes e após a construção dos pilares, respectivamente.

Observa-se pelo sinal negativo dos valores  $\xi$  que a estrutura rebaixou em todos os seus pontos de sustentação, ocorrendo o maior deslocamento vertical no ponto de controle de nível (PCN) número 4. Para cada PCN foi calculada a média aritmética dos valores dos desníveis correspondentes a cada RN (RM1, RM2 e RM3), e representada em um diagrama conforme ilustra a figura 143.

QUADRO 20 – DIFERENÇA DE DESNÍVEL (1ª DETERMINAÇÃO)

PCN	$\xi$ [mm]			
	RM1	RM2	RM3	Média
<b>P1</b>	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
<b>P2</b>	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
<b>P3</b>	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
<b>P4</b>	-0,6	-0,7	-0,4	-0,6
<b>P5</b>	-0,4	-0,4	-0,3	-0,4
<b>P6</b>	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3

FIGURA 143–DESLOCAMENTOS VERTICAIS NA ESTRUTURA DO EDIFÍCIO DA 1ªBCALBR



Estes deslocamentos podem ser significativos na determinação de linhas de base com alta precisão, considerando em especial a componente vertical. O controle de nível dos pontos de controle deverá ser realizado regularmente para garantir que eventuais recalques da estrutura decorrentes da construção dos pilares 1000 (Norte) e 2000 (Oeste) tenha se estabilizado.

#### 5.4 ANÁLISE DO ENTORNO DA ESTAÇÃO

As primeiras medições por GPS realizadas nos pilares 1000 (Oeste) e 2000 (Norte) sucederam entre 16 de setembro e 10 de novembro de 2006. Foram empregados receptores e antenas geodésicas em rastreios de 24 horas destinados à detecção e localização da influência do efeito de multicaminho dos sinais GPS. A partir destas observações, foram também realizados diversos processamentos com o

objetivo de examinar os resultados de posicionamento diante o emprego de correções do centro de fase das antenas determinadas via calibração relativa. Também foi realizada uma breve análise dos valores da relação sinal-ruído (SNR).

#### 5.4.1 Efeito de multicaminho

A influência do efeito de multicaminho nos pilares 1000 (Oeste) e 2000 (Norte) foi investigada. Foi empregado o programa Wasoft/Multipath (seção 3.2.3.3), que realiza a detecção e localização da ocorrência de multicaminho em estações de referência por meio da composição de redes de estações GPS. Neste experimento foram incluídas as estação PARA, duas estações privadas (Manfra e Pinhais) e os pilares 1000 e 2000 (quadro 21). A distância entre estas estações é de até 15 km.

QUADRO 21 – ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA PERMANENTES EMPREGADAS PARA A AVALIAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO NA 1ªBCALBR

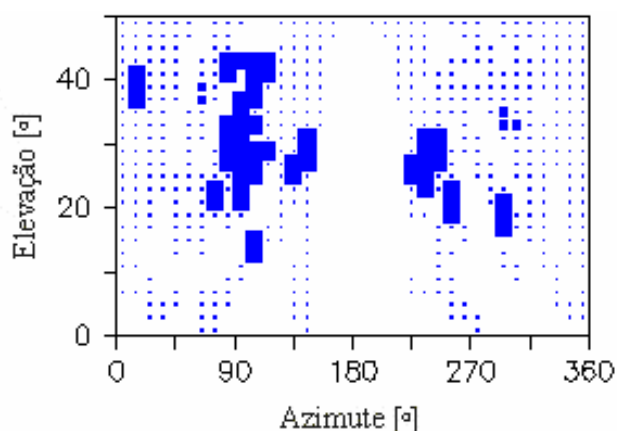
ESTAÇÃO	MUNICÍPIO	RECEPTOR/ANTENA	PORTADORAS	OBSERVAÇÃO
1000 (O)	Curitiba	*	L1/L2	Pública
2000 (N)	Curitiba	*	L1/L2	Pública
PARA	Curitiba	TRM4000SSI/TRM29659.00	L1/L2	Pública
MANFRA	Curitiba	SR530/LEIAT502	L1/L2	Privada
PINHAIS	Pinhais	Novatel/GPS702	L1/L2	Privada

\*foram empregados diferentes receptores e antenas.

Nos pilares da 1ªBCALBR, duas antenas foram empregadas nos rastreios: uma antena TRM22020.00+GP (seção 3.2.1, figura 26) e uma antena LEIAT504 (seção 3.2.1, figura 27). O plano de terra da antena TRM22020.00+GP foi retirado durante as medições (portanto denominada TRM22020.00-GP, seção 4.3.2) sob a hipótese de que a ausência deste elemento representa a situação mais favorável para a incidência de sinais refletidos, i.e., condições severas de multicaminho.

A figura 144 ilustra o mapa do multicaminho do pilar 1000 (Oeste) obtido com as observações adquiridas com a antena TRM22020.00-GP. Constata-se que a maior concentração de intensidades máximas ( $RMS > 15mm$ ) do multicaminho (quadro 10, seção 3.2.3.3) provêm de sinais de satélites situados em azimutes próximos a  $90^\circ$ , em ângulos de elevação entre  $20^\circ$  e  $40^\circ$ .

FIGURA 144–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO NO PILAR 1000 (OESTE), ANTENA TRM22020.00-GP



O exame do diagrama de obstruções (figura 145) referente ao pilar 1000 (Oeste) indica que na direção da região afetada (azimute próximo a 90°) está a estação meteorológica do SIMEPAR, local onde se encontram mastros (i.e., antenas) e outros instrumentos metálicos que podem causar algum tipo de reflexão. Também nesta direção se localiza o telhado do observatório astronômico, situado abaixo do horizonte do pilar, que de fato é a provável causa do multicaminho dos sinais. A área afetada no intervalo de azimute entre 225° e 270° (20° a 33° de elevação) está na direção de árvores existentes no entorno da estação, a qual abrange até 35° de elevação, conforme indicado no diagrama de obstruções. Contudo, a causa mais provável destes erros são reflexões de sinais no piso da lage, ao redor do pilar.

O mapa do multicaminho obtido a partir das observações adquiridas com a mesma antena (TRM22020.00-GP) no pilar 2000 (Norte) é mostrado na figura 146. Verificam-se também intensidades máximas entre os azimutes 90° e 135°, mas provindos de satélites em elevações mais altas, entre 22° e 40°. Os erros no azimute 225° podem ter origem na reflexão dos sinais na mureta de proteção da lage de cobertura do auditório (figura 139), i.e., na região próxima ao redor do pilar e abaixo do horizonte da antena. Ressalta-se que esta é a situação obtida com a antena desprovida do plano de terra. As medições realizadas com esta antena provida do plano de terra não mostraram melhoras significativas.

FIGURA 145–DIAGRAMA DE OBSTRUÇÕES DO HORIZONTE VISÍVEL A PARTIR DOS PILARES 1000 (OESTE) E 2000 (NORTE)

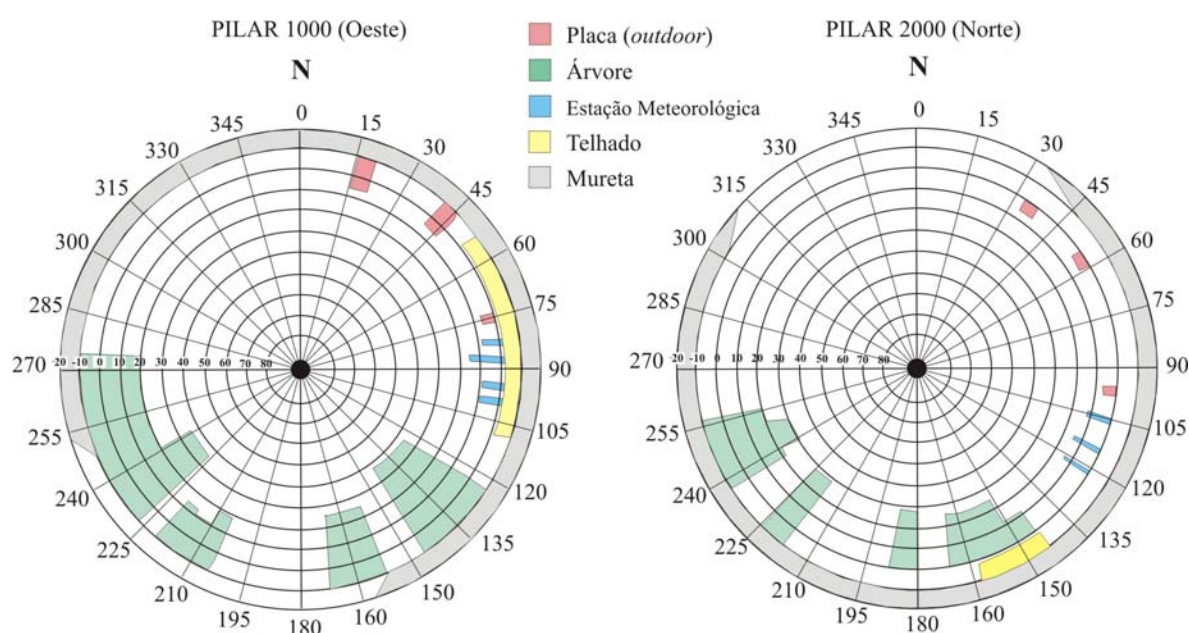
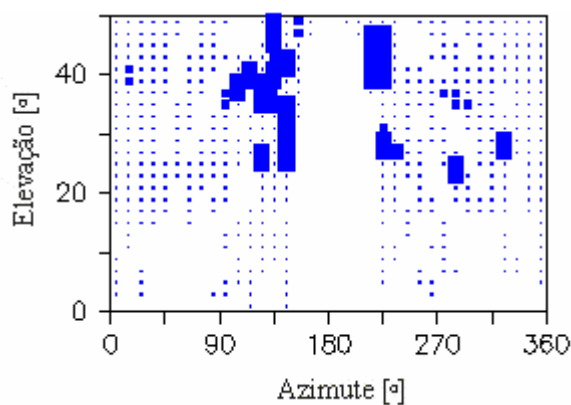


FIGURA 146–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO NO PILAR 2000 (NORTE), ANTENA TRM22020.00-GP



Pela análise dos mapas de multicaminho obtidos a partir das medições realizadas com a antena LEIAT504 (*choke ring*), verifica-se que a influência do multicaminho é reduzida em ambos os pilares. No pilar 1000 (Oeste) (figura 147) o multicaminho ocorre em pontos isolados com intensidades máximas ( $RMS > 15$  mm), sendo mais suscetível à incidência de sinais refletidos do que o pilar 2000 (Norte) (figura 148).

FIGURA 147–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO NO PILAR  
1000 (OESTE), ANTENA LEIAT504 (*CHOKE RING*)

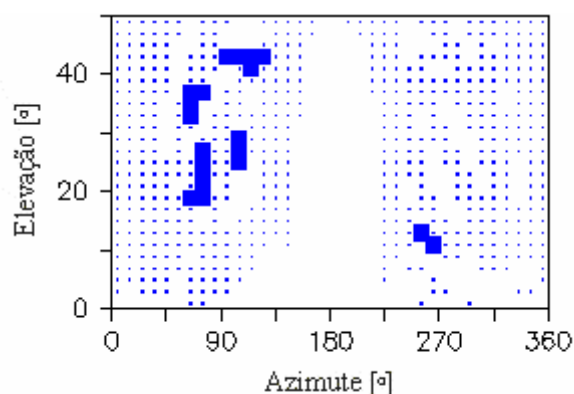
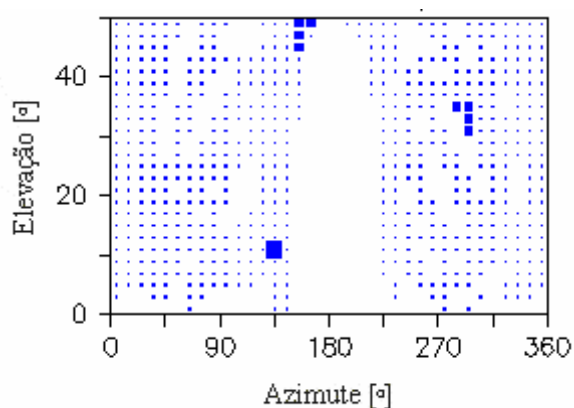
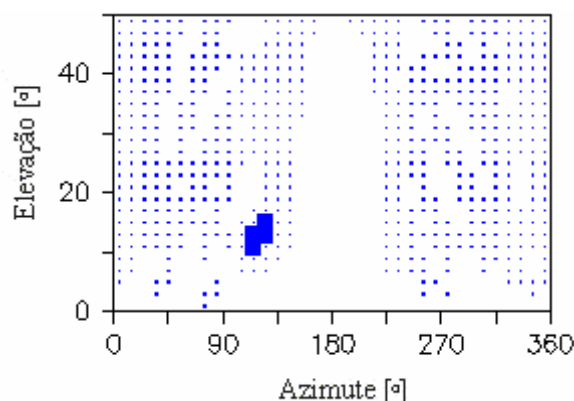


FIGURA 148–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO NO PILAR  
2000 (NORTE), ANTENA LEIAT504 (*CHOKE RING*)



A figura 149 ilustra o mapa de multicaminho da estação PARA. Constatase que a intensidade máxima de multicaminho ocorre no azimuth 135°, entre 10° e 15° de elevação. É provável que tenham ocorrido reflexões de sinal a partir da estação meteorológica do Instituto SIMEPAR, localizada nesta direção a cerca de 30 m da estação PARA.

FIGURA 149–DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO NA  
ESTAÇÃO PARA, ANTENA TRM22659.00 (*CHOKE RING*)



Conclui-se que o pilar 1000 (Oeste) é aparentemente mais afetado pelo efeito de multicaminho do que o pilar 2000 (Norte), embora tenham sido verificadas intensidades de multicaminho aproximadas. Este deve ser causado pelas mesmas fontes de reflexão uma vez que os pilares se situam contíguos na mesma plataforma (laje de cobertura), a qual deve oferecer condições de entorno similares.

#### 5.4.2 Razão Sinal-Ruído

Na seção 4.3.5 foram apresentados os conceitos da razão sinal-ruído (SNR) fornecida pelos receptores GPS na forma de números adimensionais (AMU – ingl. *Arbitrary Manufacturing Unit* – Unidade Arbitrária do Fabricante). Conforme exposto, a interpretação da SNR é assunto de atuais pesquisas que empregam métodos numéricos de análise. Nesta seção, apresenta-se uma primeira análise dos valores da razão sinal-ruído de observações realizadas nos pilares 1000 (Oeste) e 2000 (Norte) com emprego de um receptor TRM4000SSI e uma antena TRM22020.00-GP. A figura 150 e a figura 151 ilustram os valores da SNR representados em função da posição dos satélites no hemisfério celeste para os pilares 1000 e 2000, respectivamente.



FIGURA 150–VALORES DA SNR NORMALIZADOS NA PORTADORA L1, ANTENA  
TRM22020.00-GP, PILAR 1000

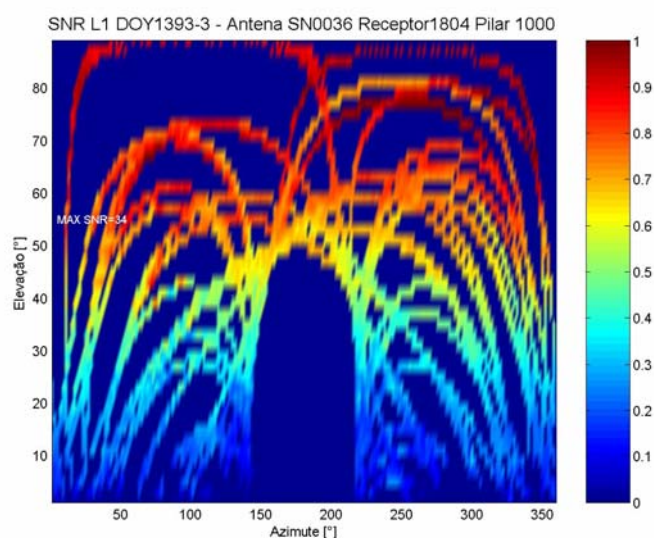
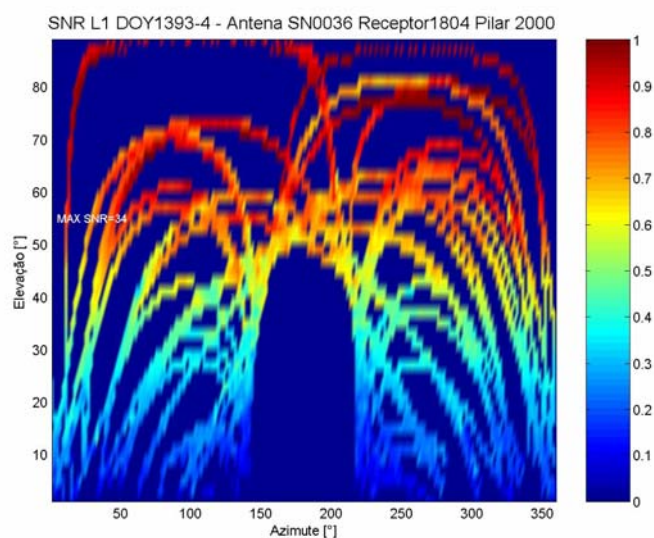


FIGURA 151–VALORES DA SNR NORMALIZADOS NA PORTADORA L1, ANTENA  
TRM22020.00-GP, PILAR 2000



Os valores normalizados da SNR foram representados nas figuras por meio de coordenadas angulares. Por eles, pode-se lançar uma análise da intensidade do sinal recebido. Observa-se que acima de 50° a intensidade é máxima, entre 30° e 50° a intensidade é média e abaixo de 30° de elevação o sinal diminui de grau de intensidade até atingir próximo a zero.

Nas figuras anteriores, é possível identificar o percurso de cada satélite para um conjunto de 24 horas de dados. Na região do hemisfério entre aproximadamente  $140^\circ$  e  $220^\circ$  de azimute e elevação de até  $50^\circ$ , observa-se a inexistência de observações em razão da região de sombra da constelação GPS (seção 2.3.3). No pilar 1000 alguns satélites apresentaram valores menores da SNR se comparados ao pilar 2000, especialmente os situados na região de  $90^\circ$  de azimute, entre  $35^\circ$  e  $50^\circ$  de elevação. Como as antenas estavam desprovidas do plano de terra, deduz-se que estes valores possam estar associados a um suposto aumento do ruído causado principalmente pelo efeito de multicaminho, conforme mostrado na comparação entre a figura 144 (pilar 1000-Oeste) e a figura 147 (pilar Norte).

Observa-se que a posição relativa dos satélites, identificada pela representação das órbitas na figura 150 (ou figura 151) difere das representações mostradas na seção 4.3.5 (p. 156). É evidente a diferença do aspecto geral dos satélites com relação à disposição do vazio ao norte (ingl. *north hole*, seção 2.3.3, p. 50), assunto que merece mais investigações.

Por meio da análise da qualidade do sinal com base nos chamados valores de sinal-ruído podem ser delimitados os fatores de influência específicos da antena e do seu entorno, como por exemplo, a dimensão, a forma e a localização do pilar de calibração. Estudos associados ao efeito de multicaminho poderão auxiliar na identificação destes fatores, que devem ser investigados para garantir a qualidade do posicionamento em futuros trabalhos de calibração de antenas de receptores GNSS.

## 5.5 ANÁLISES PRELIMINARES DA CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GPS

Foram realizadas medições divididas em quatro seções de 24 horas (máscara de elevação de  $0^\circ$ ) para a determinação das coordenadas geodésicas dos pilares 1000 (Oeste) e 2000 (Norte) visando a aplicação de valores de correção do centro de fase das antenas geodésicas. As observações foram adquiridas com o receptor Trimble 4000SSI e antena TRM22020.00+GP, ambos pertencentes ao Laboratório de Geodésia Espacial (LAGE).

No processamento com o programa GPSurvey, foram determinadas linhas de base independentes, formadas entre cada pilar e a estação de referência PARA. No pós-processamento, foram introduzidas para a antena TRM22020.00+GP as correções do centro de fase da antena SN9555, de mesmo modelo, as quais foram determinadas via calibração individual no GIK (capítulo 3). Estas correções foram convertidas para o nível relativo. Em um segundo processamento, foram introduzidos os valores de correção fornecidos pelo programa GPSurvey no formato NGS (quadro 9, seção 3.2.3.2).

Em cada seção, foram determinadas as coordenadas geodésicas dos pilares, e no final foi calculado um valor médio. No quadro 22, são indicadas as coordenadas determinadas a partir do processamento com valores de correção padrão (GPSurvey) e as coordenadas determinadas a partir do processamento com valores de calibração individual da antena SN9555 (GIK).

QUADRO 22 – COORDENADAS (UTM, WGS84) DA ANTENA TRM22020.00+GP

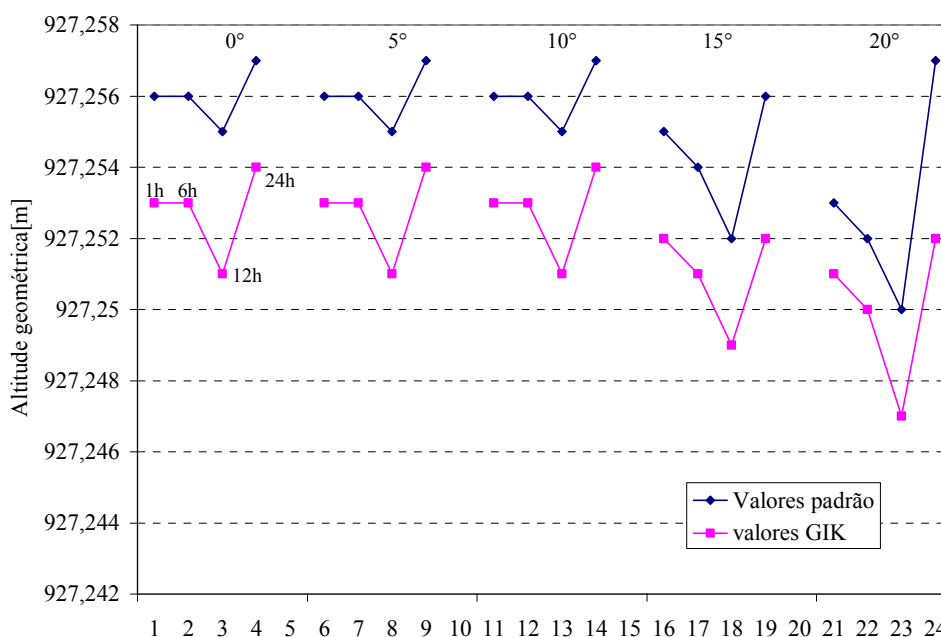
PILAR	Valores Padrão (m)			Valores GIK (m)		
	N	E	Altitude	N	E	Altitude
1000	7184194,873	677853,856	927,247	7184194,873	677853,855	927,245
2000	7184200,297	677856,107	927,256	7184200,297	677856,106	927,253

Nota-se que as coordenadas da componente norte permanecem invariáveis. Em contrapartida, surge uma diferença de 1 mm na componente leste (para ambos os pilares) e de até 3 mm na componente vertical (pilar 2000). Em face da obtenção de diferenças mais significativas na altitude geométrica, realiza-se uma análise mais detalhada desta coordenada.

As variações da componente altimétrica foram analisadas levando em consideração o intervalo de dados (tamanho da amostra) e a máscara de elevação que foram estabelecidos no processamento dos dados. Foram definidos intervalos de observação de uma, seis, doze e vinte e quatro horas, considerando em cada intervalo máscaras de elevação de 0°, 5°, 10°, 15° e 20°. Embora outras antenas tenham sido testadas, apenas os resultados da antena TRM22020.00+GP são apresentados. A figura

152 ilustra os resultados dos processamentos conforme o intervalo de dados e a máscara de elevação empregada no processamento.

FIGURA 152–COMPARAÇÃO DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA, PILAR 2000, ANTENA TRM22020.00+GP



Observa-se que os valores da altitude geométrica sofrem decréscimos conforme o ângulo de elevação aumenta. Este decréscimo se mostra constante nos dois conjuntos de dados, logo se comprovam diferenças inferiores a 10 mm na componente vertical, indicando os efeitos da aplicação de diferentes conjuntos de correção do centro de fase da antena no processamento.

Com relação ao tamanho dos dados, podem ser esperadas variações na componente vertical quando se consideram conjuntos de dados com tamanhos diferentes. Neste experimento, o processamento de 12 horas de dados e posteriormente 24 horas resultaram em diferenças de até 7 mm, considerando uma máscara de elevação mínima de 20°.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante do que foi desenvolvido e exposto neste trabalho apresentam-se as seguintes conclusões:

O objetivo principal deste trabalho (seção 1.4.1) foi plenamente alcançado por meio da investigação e introdução de um método de calibração de antenas de receptores GNSS no Brasil. Os resultados alcançados no Instituto de Geodésia de Karlsruhe, na Alemanha, mostraram que o método é eficaz e exequível à medida que se dispõe de uma estrutura apropriada para o estabelecimento de uma base de calibração no Brasil. Assim, por intermédio de uma cooperação científica da Universidade Federal do Paraná (UFPR) com o Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (GIK), somada ao incentivo e interesse dos órgãos nacionais nesta pesquisa (CAPES), foi possível construir os dois primeiros pilares de calibração (1000-Oeste e 2000-Norte) conforme exigências internacionais, os quais irão compor a Primeira Base de Calibração de Antenas GNSS do Brasil (1ªBCALBR).

A calibração de antenas GPS pelo método proposto tornou-se interessante em termos de rendimento e precisão considerando os investimentos básicos para a instalação dos equipamentos, a condução das medições e a manutenção do sistema. Os esforços operacionais são reduzidos uma vez que as medições são realizadas automaticamente, podendo também ser realizadas manualmente, porém exigindo maior tempo de rastreio. Trata-se de um método eficiente, por meio do qual podem ser determinadas as PCV dependentes de azimuth e elevação com alta resolução e considerável redução do efeito de multicaminho.

Mostrou-se a possibilidade de se obter soluções de calibração de antenas GPS no nível absoluto a partir do método relativo de calibração. Os resultados obtidos nos pilares HPF2 e NPF2 estiveram próximos aos resultados proporcionados pela calibração absoluta (Geo++) com diferenças na ordem do milímetro. As PCV de uma mesma antena GPS apresentaram diferenças significativas quando o processo de calibração foi conduzido em diferentes estações. Também a modificação da arquitetura das antenas GPS, efetivada pela retirada do plano de terra, alterou suas respostas eletrônicas ocasionando diferenças milimétricas nas PCV.

A partir de uma série de calibrações realizadas com as antenas modelo TRM22020.00+GP, TRM29659.00 e LEIAT502, constatou-se que as PCV das antenas TRM29659.00 *choke ring* apresenta comportamento mais homogêneo em relação às antenas dos outros modelos. As antenas Trimble são mais homogêneas se comparadas às antenas Leica. As primeiras exibem menos dependências em azimute e apresentam um comportamento previsível em determinadas faixas de ângulo de elevação (entre 40° e 70°) enquanto que as segundas antenas são mais vulneráveis às influências do efeito de multicaminho, pois são desprovidas de um plano de terra. Com relação ao período de validade das correções do centro de fase das antenas GPS, não foram constatadas posteriores alterações do centro de fase, salvo por influências de ordem mecânica, de forma que uma única calibração individual foi suficiente para garantir a determinação dos valores de calibração.

O efeito de multicaminho nas medições realizadas nos pilares do GIK assumiu intensidades variadas ante o emprego de diferentes adaptadores. Com adaptador longo, as observações foram menos suscetíveis à influência do multicaminho, para a qual foi similar nos pilares HPF1 e HPF2 e se manifestou com mais intensidade no pilar NPF2. Constatou-se portanto que a localização do pilar de rastreio é um fator importante na escolha do local de calibração, em vista principalmente das diferentes condições de entorno.

A influência do multicaminho nas PCV conduziram às análises da qualidade do sinal GPS. Puderam ser delimitados alguns fatores de influência específicos da antena e do seu entorno por meio da análise dos valores da relação sinal-ruído (SNR). A correlação entre os valores da SNR proveniente de diferentes cenários indicou a possibilidade de se estabelecer uma relação entre o entorno da estação e a qualidade do sinal disponibilizada pelo receptor GPS. Nesta análise, mostrou-se que o emprego de materiais absorventes de microondas justapostos na superfície do pilar representa uma solução pouco eficaz para reduzir a reflexão dos sinais GPS provindos desta região.

As experiências realizadas no Brasil mostraram que as influências do multicaminho agiram com intensidade similar nos pilares de calibração 1000 (Oeste) e 2000 (Norte), sendo o pilar 1000 (Oeste) sensivelmente mais afetado. Em vista dos

resultados obtidos na Alemanha, conclui-se que a influência do efeito de multicaminho é um aspecto extremamente importante e deve ser considerado nas medições GNSS de alta precisão, em especial na calibração de antenas de receptores GNSS.

As recomendações deste trabalho para futuras investigações são:

a) submeter à calibração instrumentos com suspeita de avarias e comparar as PCV com os resultados individuais de outros instrumentos de mesmo modelo. Tal experimento pode ser realizado com as antenas geodésicas disponíveis no Laboratório de Geodésia Espacial da UFPR (Ashtech Geodésica III e Ashtech Marine), iniciando pela determinação do CFM pelo método de rotação das antenas (seção 2.3.1), que é simples e não exige instrumentação complexa;

b) empregar outros programas de processamento GPS (e.g., Bernese e Geonap) no reprocessamento dos dados das estações da 1ªBCALBR;

c) manter continuidade nas investigações do efeito de multicaminho na 1ªBCALBR empregando materiais absorventes de microondas (MARF) sobre o telhado do observatório astronômico; aprofundar os estudos da SNR, empregando os algoritmos até então desenvolvidas na linguagem MATLAB para a constituição de um programa de análises integradas;

d) empregar as antenas supracitadas para o estudo da influência do efeito de multicaminho nos pilares da 1ªBCALBR, bem como de outras bases;

e) iniciar investigações da influência do efeito de multicaminho na estação PARA (RBMC), e.g., ao longo de cinco ou mais anos, bem como também realizar investigações dos efeitos troposféricos;

f) os programas de avaliação de dados GNSS se fundamentam em soluções diferenciais, as quais são correlacionadas com uma segunda estação de rastreamento (estação de referência). Daí, surge a necessidade de investigar os fatores relacionados ao entorno das estações envolvidas (efeito de multicaminho e ruídos) que influenciam as observações GNSS. Recomenda-se, portanto, que mais estudos sejam empreendidos acerca da escolha do local das estações de rastreamento (e.g., pilares de calibração, estações de monitoramento contínuo) em continuidade às já existentes investigações do efeito do entorno nas PCV;

g) manter continuidade aos estudos de monitoração da edificação da 1ªBCALBR, extremamente importante para a realização de medições geodésicas;

h) planejar a locação e construção do terceiro pilar da 1ªBCALBR, denominado pilar Sul (figura 143), que deverá ser edificado no alinhamento norte-sul com o pilar 2000 (Norte), nos moldes especificados pelas exigências internacionais;

i) investigar e comparar os resultados de calibrações relativas de antenas GPS realizadas em diferentes hemisférios do globo sob a hipótese de que as diferenças relativas da constelação nos dois hemisférios possam trazer como consequência diferenças significativas entre as PCV;

j) testar parâmetros troposféricos locais associados à calibração de antenas GNSS;

k) realizar testes estatísticos com os valores de calibração;

l) instalar uma câmera de vídeo para a monitoração remota da estação de calibração;

m) construir um pilar, externo à edificação, para monitorar possíveis deslocamentos dos pilares da 1ª.BCALBR bem como dos marcos RM1, RM2 e RM3 (excêntricos ao marco PARA);



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BADSTÜBNER, D. (2005). Mit Galileo ins Kataster: wird GPS und GLONASS überflüssig? **Der Vermessungsingenieur**, 6/05, p. 569-571.
- BÁNYAI, L. (2005). Investigation of GPS antenna mean phase centre offsets using a full roving observation strategy. **Journal of Geodesy** (2005) 79: 222-230.
- BALANIS C. A. (1998). **Antenna Theory: analysis and design**. 2nd edition. New York: Wiley.
- BILICH, A.; LARSON, K. M.; AXELRAD, P. (2001). **Observations of signal-to-noise ratios (SNR) at geodetic GPS site CASA: implications for phase multipath**.
- BECKER, D. (1994). Mehrwegeeinfluß bei GPS. Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, **Navigation und Kommunikation (SPN)**, 4/94.
- BLETZACKER, F. R. (1985). **Reduction of multipath contamination in a geodetic GPS receiver**. In: Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System. Positioning with GPS. Rockville, Maryland. April 15-19, 1985. Vol. 1, p. 413-422.
- BOSSLER, J. D.; GOAD, C. C.; BENDER, P. (1980). Using the global positioning system (GPS) for geodetic positioning. **Bulletin Géodésique** 54, pp. 553-563.
- BRAASCH, M. S. (1996). **GPS signal structure and theoretical performance. Global Positioning System: Theory and Applications**, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 1, Cap. 3, p. 547-566.
- BREUER, B; CAMPBELL, J.; GÖRRES B.; HAWIG, J.; WOHLLEBEN, R. (1995). Kalibrierung von GPS-Antennen für hochgenaue geodätische Anwendungen. Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, **Navigation und Kommunikation (SPN)**, 2/95.
- BRUNNER, F. K.; HARTINGER, H.; TROYER, L. (1999). GPS signal diffraction modelling: the stochastic SIGMA- $\Delta$  model. **Journal of Geodesy** 73:259-267.
- BÖDER, V.; MENGE, F.; SEEGER, G.; WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M. (2001). **How to deal with station dependent errors** – new developments of the absolute field calibration of PCV and Phase-Multipath with a precise robot. In: ION GPS 2001.
- BUTSCH, F. (1997). Elektromagnetische Störungen bei GPS. **Allgemeine Vermessungs-Nachrichten**, n° 5/1997, p. 178-183.
- CAMARGO, P. O. (1999). **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. Curitiba, 1999. 191 f.

Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná.

CARR, J. J. (1998): **Practical Antenna Handbook**. 3rd Edition, Verlag, McGraw-Hill, Inc., New York.

CHAPMAN, S. J. (2003). **Programação em MATLAB para engenheiros**. Stephen J. Chapman; tradução técnica Flávio Soares Correa da Silva. São Paulo: Pioneira Thomson Learning.

CROSS, P. A (1999). **Accuracies achievable by GPS in practical engineering and surveying applications**. Proceedings of Geodesy and Surveying in the future: the importance of heights. Gävle, Sweden: National Land Survey of Sweden; p. 175-184.

DAVID, H. (2005). Galileo – der Countdown hat begonnen. **Allgemeine Vermessungs-Nachrichten**, nº. 10/2005, p. 322-330.

DIERENDONCK, A. J. (1996). GPS Receivers. In: Parkinson, B. W., J. J. Spilker (Hrsg.): **Global Positioning System: theory and applications**. Vol. 1, p. 329-407. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

DIN/NABau (2003). DIN18727 – **Kalibrierung von GNSS-Antennen**. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Normenausschuss Bauwesen (NABau), NABau-Arbeitsausschuss 03.04.00 „Geodätische Instrumente und Geräte“, Versão de manuscrito, fevereiro 2003.

DINWIDDY, S. E.; RODRIGUEZ, R. L.; BENEDICTO, J. R. (2001). **Galileo System requirements Documents**. ESA-APPNS-REQ-00011. Disponível em <[http://ertms.uic.asso.fr/documents/galileo/galileo\\_sys\\_require.pdf](http://ertms.uic.asso.fr/documents/galileo/galileo_sys_require.pdf)>. Pesquisa realizada em 03 de janeiro de 2006.

EISSFELLER, B. (2002). **Das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO**. In: Heck, B; Illner, M. (redatores). GPS 2002: Antennen, Höhenbestimmungen und RTK-Anwendungen. Schriftreihe 44/2002, p. 28-45. Stuttgart: Wittwer.

FALCONE, M.; NAVARRO-REYES, D.; HAHN, J.; OTTEN, M.; PIRIZ, R.; PEARLMAN, M. (2006). **Satellite Laser-Ranging Campaigns**: GIOVES's Track. GPS World, November 2006, p. 34-37.

FAGGION, P. L.; FREITAS, S. R. C. (1998). **Desníveis de Alta Precisão com TC2002, N3 e NA3003, Metodologia e Resultados**. In: COBRAC - COBRAC 98 · Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário · UFSC Florianópolis.

FARRET, J. C. (2000). **O efeito do multicaminho estático nas medidas da fase das portadoras GPS**. Curitiba, 2000. 132 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná.

FENTON, P. (2006). **Will the new L2C signals be able to be tracked by existing L2-capable (civilian) receivers?** Inside GNSS. P. 20-22.

FONSECA JUNIOR, E. S. (2002). **O sistema GPS como ferramenta para a avaliação ionosférica no Brasil.** São Paulo, 2002. 176 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FREIBERGER, J.; SEITZ, K.; MAYER, M.; NUCKELT, A.; KNÖPFLE, A. (2004). **Calibração de antenas GPS no Geodätisches Institut Karlsruhe:** emprego do sistema DRB e programa Wasoft-Kalib. Trabalho científico interno, não publicado, 21 p.

FREVERT, V., NUCKELT, A., STÖCKER, D. (2003). **Beschleunigte Feldkalibrierung von GPS-Antennen.** DGON-Symposium POSNAV 2003, Dresden, 18./19.3.2003. Schriftenreihe des Geodätischen Instituts, Heft 3.

GEIGER, A. (1988). **Einfluss und Bestimmung der Variabilität des Phasenzentrums von GPS-Antennen.** Mitteilungen Nr. 43., 66 p. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich.

GEMAEL, C. (1994). **Introdução ao justamento de Observações:** aplicações geodésicas. Curitiba: Editora da UFPR.

GEMAEL, C.; ANDRADE, J. B. (2004). **Geodésia Celeste.** Curitiba: Editora da UFPR.

GEORGIADOU, Y.; KLEUSBERG, A. (1988). On carrier signal multipath effects in relative GPS positioning. **Manuscripta Geodaetica** (1988) 13: 172-179.

GÖRRES, B.; CAMPBELL, J.; BECKER, M.; SIEMES, M.; (2006). Absolute calibration of GPS antennas: laboratory results and comparison with field and robot techniques. **GPS Solutions** 10: 136-145.

GPS WORLD (2006). **GPS receiver survey.** GPS World, January 2006, p. 36-55.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. (2001). **GPS: theory and practice.** 3.ed. Wien: Springer.

HOTHEN, L. (2006). **GPS Modernization Program:** current status and plans. In: IGS Workshop 2006, Darmstadt, Germany. 10 may 2006. Disponível em <<http://nng.esoc.esa.de/ws2006/session08.html>>. Pesquisa realizada em 30 de janeiro de 2007.

IBGE (2006). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Padronização de marcos geodésicos.**

IBGE (2007). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em 17 de janeiro de 2007.

IEEE (1983). **IEEE Standard definitions of terms for antennas** – Std 145-1983. Institute of Electrical and Electronics Engineers. New York, USA. Disponível em <http://ieeexplore.ieee.org/iel1/2462/1290/00030651.pdf?arnumber=30651>. Pesquisa realizada em 22 de novembro de 2005.

IFADIS, I. M. (1992). **The excess propagation path of radio waves**: study of the influence of the atmospheric parameters on its elevation dependence. Survey Review, vol. 31, n. 243, p. 289-298.

JENSEN, A. B. O. (2002). **Numerical weather predictions for network RTK**. Publications series 4, vol. 10. National Survey and Cadastre – Denmark 2002.

JOHNSON, R. C. (1993). **Antenna Engineering Handbook**. 3rd edition, New York: McGraw-Hill.

KAHMEN, H. (1978). **Elektronische Meßverfahren in der Geodäsie**: Grundlagen und Anwendungen. – 2., überarb. u. erg. Aufl.. Karlsruhe: Wichmann.

KANIUTH, K.; KLEUREN, D.; TREMEL, H.; SCHLÜTER, W. (1998). Elevation-abhängige Phasenzentrumsvariationen geodätischer GPS-Antennen. **Zeitschrift für Vermessungswesen**, Heft 10, Oktober 1998.

KLOBUCHAR, J. A. (1991). **Ionospheric effects on GPS**. GPS World, April 1991, p. 48-51.

KLOBUCHAR, J. A. (1996). **Ionospheric effects on GPS**. In: Parkinson, B. W., J. J. Spilker (Hrsg.): Global Positioning System: theory and applications. Vol. 1, p. 485-515. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

KRAUS, J. D. (1983). **Antenas**. Tradução de Paulo Antônio Mariotto. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois.

KRAUS, J. D. (1988). **Antennas**. 2nd Edition. New York: Mc Graw-Hill.

KRAUS, J. D.; MARHEFKA, R. J. (2002). **Antennas**: for all applications. 3th Edition. New York: Mc Graw-Hill.

KRUEGER, C. P. (1996). **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho**. Curitiba, 1996. 267 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná.

LANGLEY, R. B. (1997). **GPS receiver system noise**. GPS World, June 1997, p. 40-45.

LANGLEY, R. B. (1998a). **A primer on GPS antennas**. GPS World, July 1998, p. 50-54.

LANGLEY, R. (1998b). Propagation of the GPS Signals and GPS Receivers and the Observables. **GPS for Geodesy**. In: Teunissen P. J. and Kleusberg A. (editors), Springer, 2.edition, 1998, p. 112-185.

LANGLEY, R. (2006a). **Navstar GPS Constellation Status**. Documento de 6/12/2006. Disponível em <<http://gge.unb.ca/Resources/GPSConstellationStatus.txt>>. Pesquisa realizada em 30 de janeiro de 2007.

LAU, L.; MOK, E. (1999). Improvement of GPS relative positioning accuracy by using SNR. **Journal of Surveying Engineering**. Vol. 124, Nov.1999, p. 185-202.

LAURILA, S. H. (1976). **Electronic surveying and Navigation**. Toronto:Wiley.

LEICK, A. (1995). **GPS Satellite Surveying** – 2. edition. New York: Wiley.

LACHAPELLE, G. (1990). **GPS observables and error sources for kinematic positioning**. In: Schwarz, K.-P.; Lachapelle, G. (Ed.): Kinematic Systems in Geodesy, Surveying and Remote Sensing, Scientific Assembly of the International Association of Geodesy. Banff, Alberta, Canada, September 10-13, 1990, IAG Symposia n. 107, p. 17-26.

LORRAIN, P.; CORSON, D.; LORRAIN, F. (1988). **Campos e ondas eletromagnéticas**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

MACHADO, K. D. (2002). **Teoria do Eletromagnetismo**. Volume II. Ponta Grossa: Editora UEPG.

MACHADO, K. D. (2006). **Teoria do Eletromagnetismo**. Volume III. Ponta Grossa: Editora UEPG.

MADER, G. (1999). GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. **GPS Solutions**, Vol. 3, Nº 1, p.50-58.

MAYER, M. (2002). **GPS Antennenkalibrierung**. In: Heck, B; Illner, M. (redatores). GPS 2002: Antennen, Höhenbestimmungen und RTK-Anwendungen. Schriftreihe 44/2002, p. 118-134. Stuttgart: Wittwer.

MAYER, M. (2006). **Using GNSS observations in order to detect highly precise deformation rates**. DAAD-gefördertes Programm des Projektbezogenen Personenaustauschs ProBrAl, 14.09.2006, Curitiba, Brasilien.

MENGE, F.; SEEGER, G.; VÖLKSEN, C. WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M. (1998). **Results of absolute field calibration of GPS antenna PCV**. In: Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS-98, September 15-18, Nashville, Tennessee.

- MENGE, F. (2003). **Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung.** 198 f. genehmigte Dissertation. Hannover 2003.
- MONGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. (2003). **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** Segunda edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.
- MONICO, J. F. G. (2000). **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS:** descrição, fundamentos e aplicações. São Paulo: UNESP.
- MOORE, A.; WEBER, R. (2002). Workshop recommendations. Workshop proceedings 2002 IGS-Workshop, Network, Data and Analysis Center Workshop Towards Real-Time, Ottawa, Canada, april 8-11.
- NGS (2005). National Geodetic Survey. Disponível em <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>. Pesquisa realizada em 19 de outubro de 2005.
- OIU, W.; LACHAPELLE, G.; CANNON, M. E. (1995). Ionospheric effect modelling for single frequency GPS users. **Manuscripta Geodaetica** (1995) 20: 96-106.
- PINKER, A.; ADAMS, S.; PEEPLES, D. (1998). **The saga of L.** 1998. In: Proceedings of the National Technical Meeting "Navigation 2000". ION GPS, January 21-23, 1998, California.
- PLUNDAHL, P. (2003). Disponível em <<http://home.iae.nl/users/plundahl>>. Acesso em 11 de abril, 2003.
- RAY, J. K.; CANNON M. E. (1999). **Characterization of GPS carrier phase multipath.** Presented at ION NTM-99, San Diego, January 25-27.
- RAY, J. K. (2000), **Mitigation of GPS code and carrier phase multipath effects using a multi-antenna system.** PhD Thesis. UCGE Reports n. 20136. Calgary, Canada.
- RIBEIRO, J. A. J. (2004). **Propagação das ondas eletromagnéticas:** princípios e aplicações. 1ª. Edição. São Paulo: Érica.
- RIOS, L. G.; TERRA, E. B. (1982). **Engenharia de Antenas.** São Paulo: Edgard Blücher.
- ROTHACHER, M.; SCHAER, S.; MERVART, L.; BEUTLER, G. (1995). **Determination of antenna phase center variations using GPS data.** In: IGS Workshop, Potsdam, Germany, may 15-17.
- ROTHACHER, M.; SCHMID, R. (2002). **GPS-Antennenkalibrierungen aus nationaler und internationaler Sicht.** In: Tagungsband des 4. SAPOS-Symposiums, Hannover.

ROTHACHER, M. (2001). Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. **GPS Solutions**, Vol. 4, p. 55-60.

ROTHACHER, M.; SCHMID, R. (2006). **ANTEX**: The Antenna Exchange Format Version 1.3 Disponível em <ftp://epncb.oma.be/pub/station/general/antex13.txt>. Pesquisa realizada em 15 de dezembro de 2006.

ROTHAMMEL, K. (1995). **Rothammels Antennenbuch**. 11. Auflag, Verlag Franckh-Kosmos, Stuttgart.

RÓZSA, SZ.; MAYER, M.; WESTERHAUS, M.; SEITZ, K; HECK, B. (2005). Towards the determination of displacements in the Upper Rhine Graben area using GPS measurements and precise antenna modelling. **Quaternary Science Reviews**. P. 427-440.

RTCM Radio Technical Commission for Marine Service (2001). RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service, version 2.3 (RTCM paper 136-2001/SC104-STD). <<http://www.rtcn.org>>.

RYF, A. (1993). Zur Kalibrierung von GPS-Antennen. **VPK** 7/93, S. 452-455 Disponível em : <<http://www.geometh.ethz.ch/about/staff/adrian/ryf.asp>>.

RÜFFER, J.; HEMMERT, J. (2005). Galileo meets Geodesy: was bringt uns Galileo für die GNS-Anwendung in der Geodäsie. **Der Vermessungsingenieur**, 6/05, p. 520-526.

SAASTAMOINEN, J. (1972). **Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites**. In: Henriksen, S. W.; Mancini, A.; Chovitz, B. H. (Ed.). The use of artificial satellites for Geodesy. American Geophysical Union. Geophysical monograph, p. 247-251.

SATIRAPOD, C. (2006). Stochastic models used in static GPS relative positioning. **Survey Review**, vol. 38, n. 299, p. 379-386.

SCHMITZ, M. (2001), **Spezielle Untersuchungen und Ergebnisse zum PCV von GPS-Antennen**. Wissenschaftliche Arbeit Nr. 239, p. 101-112.

SCHMITZ, M.; WÜBBENA, G. (2001). **Remarks on Effects of the SCIS Radome on PCV**. Garbsen, Germany.

SCHMITZ, M. (2005). Comunicação pessoal em 9 de fevereiro de 2005. Garbsen, Alemanha.

SCHÖDLBAUER, A. (2000). **Geodätische Astronomie**: Grundlagen und Konzepte. Berlin: W. de Gruyter.

SCHMITZ, M.; WÜBBENA, G.; BOETTCHER, G. (2001). **Umrechnung des Niveaus von GPS Antennenkalibrierungen**. Wiss. Arb. Nr. 239 p. 1-4.

SCHMITZ, M., G. WÜBBENA, G. BOETTCHER, G. SEEGER, V. BÖDER, F. MENGE (2002). **Absolute Receiver Antenna Calibrations with a Robot.** Presentation at IGS Workshop "Towards Real-Time", April 8-11, 2002, Ottawa, Canada.

SEEGER, G., F. MENGE, C. VÖLKSEN, G. WÜBBENA, M. SCHMITZ (1997). **Precise GPS Positioning Improvements By Antenna and Site Dependent Effects.** Presented at the IAG Symposium, IUGG Assembly, September 1997, Rio de Janeiro, Brasil. IAG Symposium, n. 115, Springer Verlag.

SEEGER, G. (1993). **Satellite Geodesy.** Berlin: de Gruyter.

SEEGER, G. (2000). **Real-time satellite positioning on the centimetre level in the 21st century using permanent reference stations.** In: Nordie Geodetic Summerschool, Fevik, Norway.

SEEGER, G. (2003). **Satellite Geodesy.** 2nd edition. De Gruyter: Berlin.

SIMS, M. L. (1985). **Phase Center Variation in the Geodetic TI4100 GPS Receiver System's Conical Spiral Antenna.** Proceedings First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, p. 227-244.

SCHÜLER, T. (2001). **On ground-based GPS tropospheric delay estimation.** München, 2001. PhD Thesis (Ingenieurwissenschaften). Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München.

SCHULTE, M.; FREDEBURG, B. (2001). Kalibrierung von GPS-Antennen. Der **Vermessungsingenieur** Nr. 1/01, p. 56-61.

SCHUPLER, B. R.; CLARK, T. A. (1991). **How different antennas affect the GPS observable.** GPS World, November/December 1991, p. 32-36.

SCHUPLER, B. R.; CLARK, T. A. (2000). **High Accuracy Characterization of Geodetic GPS Antennas Using Anechoic Chamber and Field Tests.** Proceedings of the ION GPS 2000, 19-22 September, Satl Lake City, UT.

SCHUPLER, B. R.; CLARK, T. A. (2001). **Characterizing the behavior of Geodetic GPS antennas.** GPS World, February 2001, p. 48-55.

SILVA, G. V. F. (1977). **Telecomunicações:** sistemas radiovisibilidade. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.

SIMS, M. L. (1985). **Phase Center Variation in the Geodetic TI4100 GPS Receiver System's Conical Spiral Antenna.** In: Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System. Positioning with GPS. Rockville, Maryland. April 15-19. Vol. 1, p. 227-244.



SLEEWAEGEN, J.-M. (1997). **Multipath mitigation, benefits from using the signal-to-noise ratio.** In: Proceedings of the ION GPS 1997, p. 531-540.

SLUTTER, C. R.; KRUEGER, C. P.; MITISHITA, E. A.; VEIGA, L. A. K.; OLIVAS, M. A. A.; FAGGION, P. L. (2001). **Mapeamento da Cidade Universitária.** CD-ROM. Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SPIPKER, J. J. (1996). **Tropospheric Effects on GPS.** In: Parkinson, B. W., J. J. Spilker (Hrsg.): Global Positioning System: theory and applications. Vol. 1, p. 517-546. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

SOUZA, E. M.; CANDUCCI, G. W.; MONICO, J. F. G. (2005). Avaliação do nível de multicaminho no posicionamento relativo GPS e sua atenuação através da análise de multiresolução. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Vol. 11, n. 2, p. 221-234.

SUN, Z. (2005). **Satellite networking: principles and protocols.** West Sussex: Willey.

THIEL, K. -H. (1995). Einfluss von Mehrwegesignalen. Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, **Navigation und Kommunikation (SPN)**, 3/95, 4. Jahrgang.

TRANQUILLA, J. M.; COLPITTS, B. G. (1989). GPS Antenna designs characteristics for high-precision applications. **Journal of Surveying Engineering.** Vol. 115, n.1, p. 2-14.

TRANQUILLA, J. M.; COLPITTS, B. G.; CARR, J. P. (1989). **Measurement of low-multipath Antennas for Topex.** In: 5th INTERNATIONAL GEODETIC SYMPOSIUM ON SATELLITE POSITIONING. Las Cruces, New Mexico. P. 356-361.

UNAVCO (2006). University NAVSTAR Consortium. **TEQC – Tutorial.** Disponível em <<http://www.unavco.org>>. Pesquisa realizada em 20 de dezembro de 2006.

VENTURI, J. J. (1990). **Álgebra vetorial e geometria analítica.** 3. ed. Curitiba: Scientia et Labor.

WANNINGER, L.; MAY, M. (2000). **Carrier phase multipath calibration of GPS reference stations.** Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GPS 2000, Salt Lake City, UT, USA, September 19-22, 2000, p. 132-144.

WANNINGER, L. (2000). **Präzises Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen.** München, 2000. 68 f. Dissertation – Deutsche Geodätische Kommission, Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

WANNINGER, L. (2001). **Kalibrierung von Phasenmehrwegeeeinflüssen auf GPS-Referenzstationen.** Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover. Festschrift N. 239, p.123-133.

WANNINGER, L. (2002a). Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennenkalibrierung. **Zeitschrift für Vermessungswesen.** N. 1/2002, p.51-58.

WANNINGER, L. (2002b): **Kalibrierung von Referenzstationen?** 4. GPS-Antennenworkshop, Hannover, 21. Mai 2002. Disponível em <<http://www.wasoft.de>>. Pesquisa realizada em 15 de novembro de 2005.

WANNINGER, L. (2003a). Anleitung WaSoft/Multipath 3.2.

WANNINGER, L. (2004a). Anleitung WaSoft/Kalib 3.31.

WANNINGER, L. (2004b). Anleitung CCANT 2.1. Neuwied.

WANNINGER, L. (2004c). Comunicação pessoal em 13 de maio e em 20 de julho de 2004: Instituto de Geodésia de Karlsruhe, Alemanha.

WANNINGER, L. (2007). Programm Wa1/Kalib, Version 1.2. Disponível em <<http://www.wasoft.de>>. Pesquisa realizada em 22 de janeiro de 2007.

WELSHE, R. G.; LADD, J. W.; CAIN, J. D. (1986). **Macrometry II portable GPS surveyor.** In: Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning. Texas at Austin, April 28 – May 2, 1986. Vol. 1, p. 431-437.

WIESBECK, W. (2002). **Antennen und Antennensysteme. Vorlesung zur Antennen und Antennensysteme.** Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik der Universität Karlsruhe.

WIESBECK, W., YOUNIS, M., HAGEN, J. (2001). **Introduction to Microstrip Antennas.** Lectures notes to Introduction to Microstrip Antennas. Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik der Universität Karlsruhe.

WÜBBENA, G.; MENGE, F.; SCHMITZ, M.; SEEGER, G.; VÖLKSEN, C. (1996). **A new approach for field calibration of antenna phase center variations.** In: Proceedings of the 9th. International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS-96.

WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; BOETTCHER, G.; MENGE, F.; BÖDER, V.; LEISTNER, H.; SEEGER, G. (2000a). **Absolute Feldkalibrierung von GPS-Antennen** – Ergebnisse, GPS-Antennenworkshop, May 10, Institut für Erdmessung, Hannover.

WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; MENGE, F.; BÖDER, V.; SEEGER, G. (2000b). **Automated absolute field calibration of GPS-Antennas in real time.** In:

Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 2000, p. 2512-2522. Salt Lake City, Utah.

WÜBBENA, G. (2002). **Zur großräumigen Echtzeit-Vernetzung von GNSS Referenzstationen.** Zur großräumigen Vernetzung, 4. SAPOS Symposium, Hannover.

WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M. (2002). **Weitere Aspekte zur Kalibrierung von GNSS-Systemen.** In: 4. GPS-Antennen Workshop, 21. Mai 2002, Hannover.

WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; BOETTCHER, G.; SCHUMANN, C. (2006a). **Neue Aspekte bei der Roboterkalibrierung.** In: 6. GPS-Antennen-Workshop, Geodätisches Institut, Rheinische Friedrich-Wilhelm Universität Bonn.

WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; BOETTCHER, G. (2006b). **Absolute GNSS antenna calibration with a robot: repeatability, GLONASS and carrier-to-noise pattern.** In: 10th EUPOS ICS, 21-24 November 2006. Budapest, Hungria.

WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; BOETTCHER, G. (2006c). **Separation of near-field and far-field multipath: new strategies for station calibration.** In: 10th EUPOS ICS, 21-24 November 2006. Budapest, Hungria.

YINGER, C. H.; FEESS, W. A.; NUTH, V.; HADDAD, R. N. (????). GPS Accuracy versus Number of NIMA Stations.

## APÊNDICES

APÊNDICE 1 – OPÇÕES DE OPERAÇÃO DO MÓDULO WAANT .....	194
APÊNDICE 2 – MODELO DA CADERNETA DE CAMPO EMPREGADA PARA CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GPS NO GIK.....	195
APÊNDICE 3 – EXEMPLO DE ARQUIVO DE CALIBRAÇÃO NO FORMATO GEO++ (PCV EM ELEVAÇÃO).....	196
APÊNDICE 4 – DIAGRAMAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVAÇÃO.....	197
APÊNDICE 5 – CONFIGURAÇÃO DOS CENÁRIOS PARA ANÁLISE DA CORRELAÇÃO DA SNR .....	203

## APÊNDICE 1 – OPÇÕES DE OPERAÇÃO DO MÓDULO WAANT

- +E - estimacão das PCV dependentes de elevacão além do PCO;
- +AE - estimacão das PCV dependentes de azimute e elevacão além do PCO;
- +M# - introduçã dos valores de PCO contidos no arquivo #;
- e# - máscara de elevacão;
- SV# - satélite # deve ser negligenciado no processamento;
- +R# - fixacão da taxa de dados em segundos;
- +o# - fornece saídas adicionais para a estacão de calibraçã (sta2).

As opções sã:

- +o0 : arquivo sta2.ATX no formato ANTEX;
- +li : arquivo sta2.APC no formato IGS (nã para a opçã +AE);
- +o1 : arquivo sta2.APC no formato NGS (nã para a opçã +AE);
- +o2 : arquivo sta2.ANT no formato Geo++;
- +o3 : arquivo sta2.PCO no formato PCO (nã para as opções +E ou +AE);
- +o4 : arquivos sta2.PL1, sta2.PL2 e sta2.PL0, no formato vetorial para as PCV em L1, L2 e L0 (apenas para as opções +E ou +AE);

## APÊNDICE 2 – MODELO DA CADERNETA DE CAMPO EMPREGADA PARA CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GPS NO GIK



### Caderneta de campo para calibração de antenas GPS

#### Trabalhos de campo

##### Data/Hora

Data e hora de início: .....

Semana e dia GPS: .....

Data e hora de término: .....

Semana e dia GPS: .....

Operador: .....

##### Dados da antena a ser calibrada

Tipo da antena: .....

Número de série: .....

Tipo de receptor: .....

Número de série: .....

Proprietário antena: .....

Proprietário receptor: .....

Pilar ocupado: .....

DRB nº: .....

##### Dados da antena de referência

Tipo da antena: .....

Número de série: .....

Tipo de receptor: .....

Número de série: .....

Proprietário antena: .....

Proprietário receptor: .....

Pilar ocupado: .....

##### Leituras de nívelamento

Referência de nível (RN) ..... ARP: .....  $H = ARP - RN =$  .....

#### Processamento

Data e hora: .....

Programa: .....

Operador: .....

Observações:

## APÊNDICE 3 – EXEMPLO DE ARQUIVO DE CALIBRAÇÃO NO FORMATO GEO++ (PCV EM ELEVAÇÃO)

```

*****
# Antenna Calibration Results  WASOFT/KALIB-module WAANT 3.3  07.02.2005
*****
#
# Calibrated Antenna: 8918          TR GEOD L1/L2 GP
#
# Reference Antenna : 0220181798      TRM29659.00  NONE
# corrected using : 181798.ant
# at position (XYZ) : 4146524.6540  613137.8150  4791516.9500
# (LLH) : 49  0 40.47258  8 24 40.51852  182.885
#
# Observation Sessions:
# Session/Rotation: 1 014n/2005  0
# Session/Rotation: 2 014o/2005  90
# Session/Rotation: 3 014s/2005  180
# Session/Rotation: 4 014w/2005  270
#
# Height difference (levelling): -1.3982 m
# Approximate distance: 23.6 m
# Elevation mask for PCO: 15 deg
#
TYPE= TR GEOD L1/L2 GP
NO OF FREQUENCIES=2
OFFSETS L1= 0.00188 -0.00091 0.06965
OFFSETS L2= -0.00132 0.00071 0.07504
ELEVATION INCREMENT=5
AZIMUTH INCREMENT=0
VARIATIONS L1=
0.00000 -0.00313 -0.00163 -0.00013 0.00069 0.00080 0.00064 0.00064 0.00080 0.00081 0.00040 -0.00030 -
0.00092 -0.00114 -0.00096 -0.00071 -0.00063 -0.00072 -0.00078
VARIATIONS L2=
0.00000 -0.00005 0.00008 -0.00016 -0.00066 -0.00088 -0.00050 0.00012 0.00041 0.00028 0.00016 0.00034
0.00056 0.00031 -0.00047 -0.00123 -0.00144 -0.00117 -0.00097

```

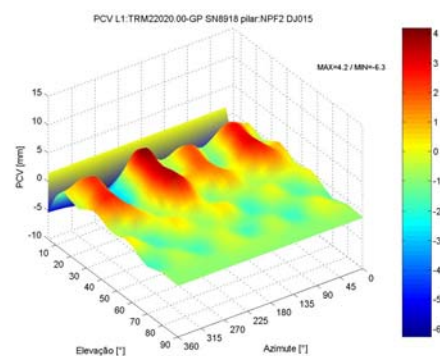
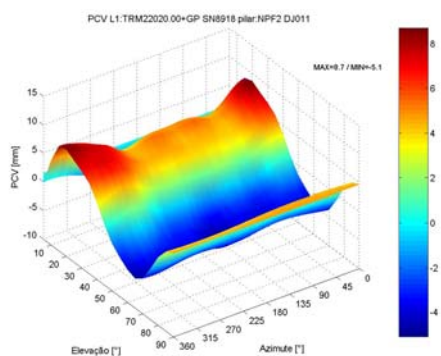
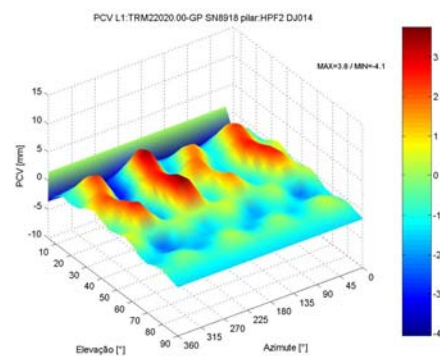
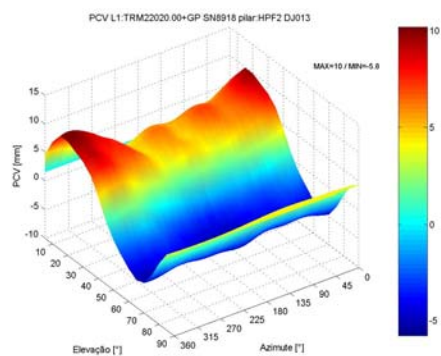
# APÊNDICE 4 – DIAGRAMAS DAS PCV DEPENDENTES DE AZIMUTE E ELEVÇÃO

## ANTENA TRM22020.00 SN8918, PILARES HPF2 E NPF2

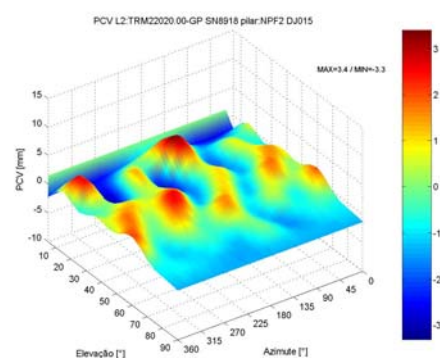
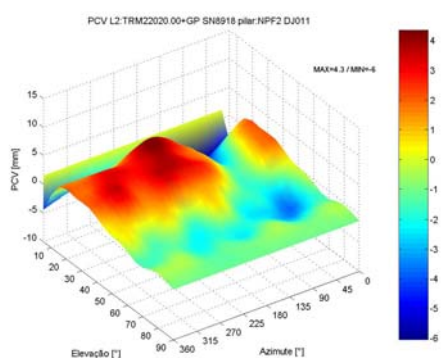
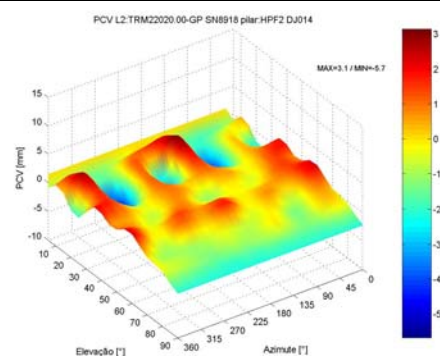
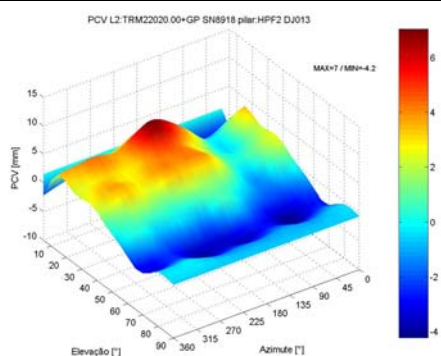
22020.00+GP

22020.00-GP

$L_1$

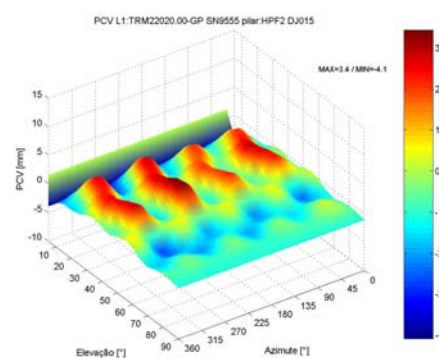
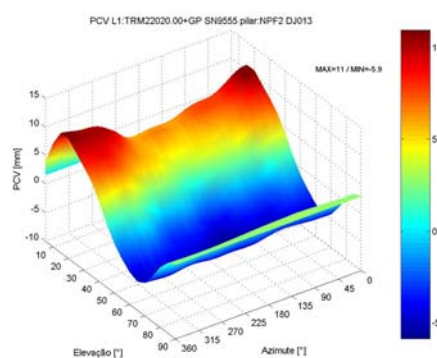
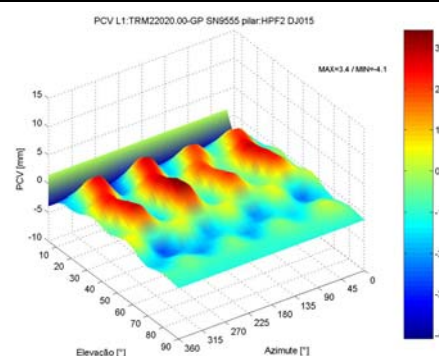
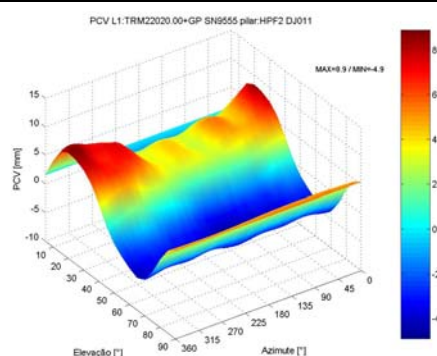
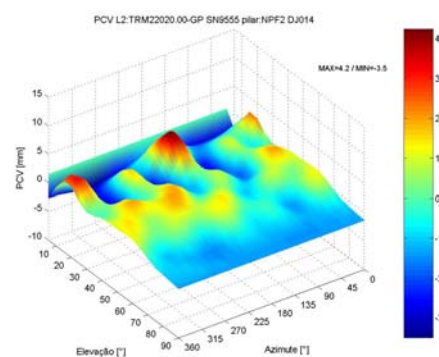
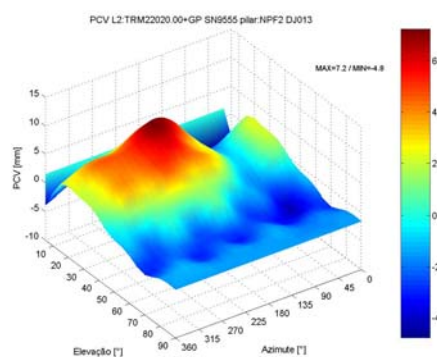
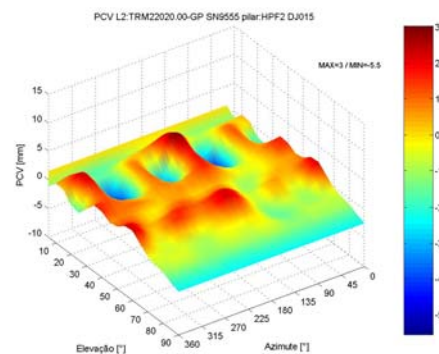
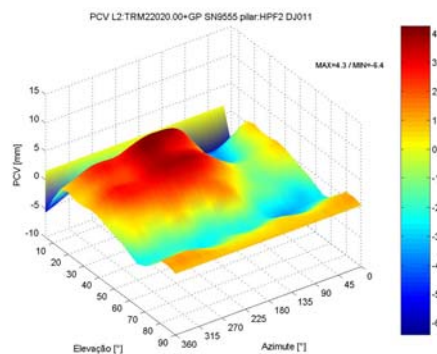


$L_2$



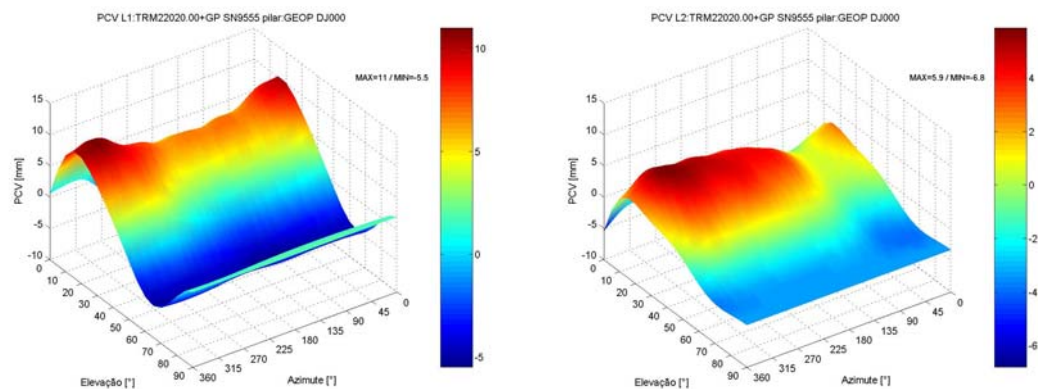


## ANTENA TRM22020.00 SN9555, PILARES HPF2 E NPF2

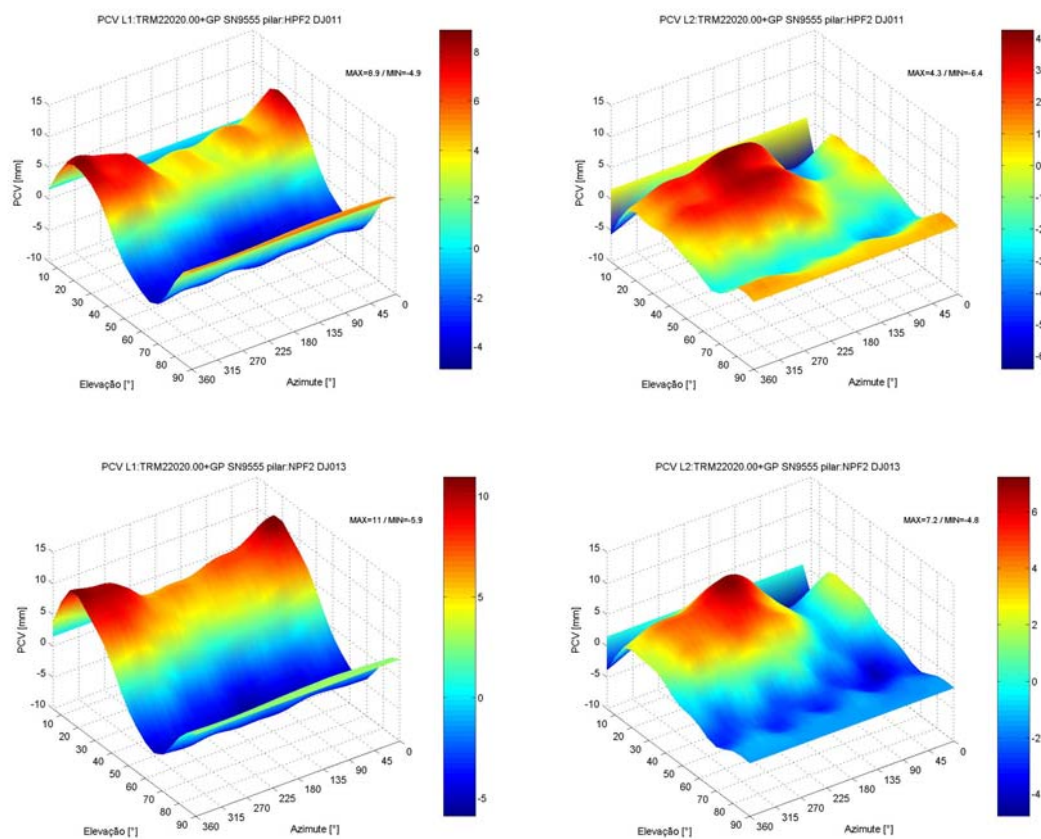
*22020.00+GP**22020.00-GP* $L_1$  $L_2$ 

ANTENA TRM22020.00+GP SN9555.

GEO++

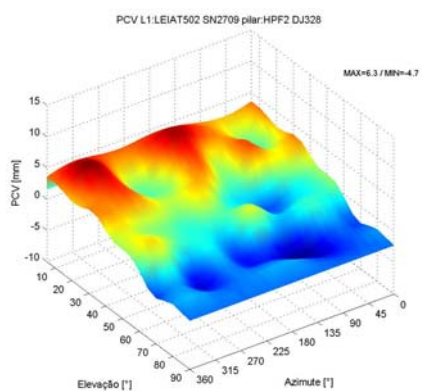


GIK (Absoluto)

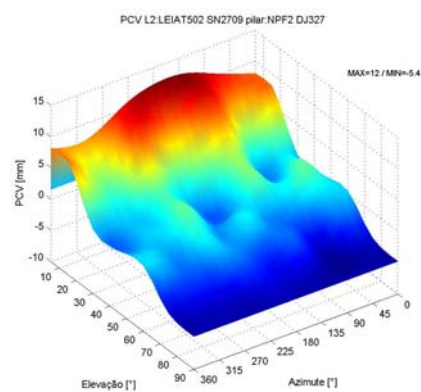
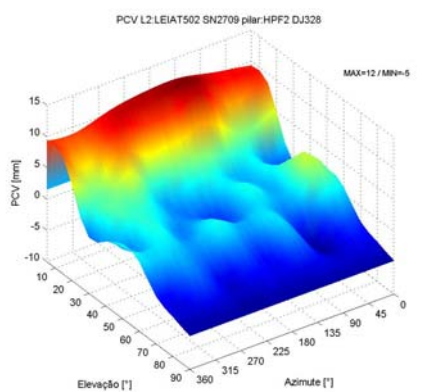
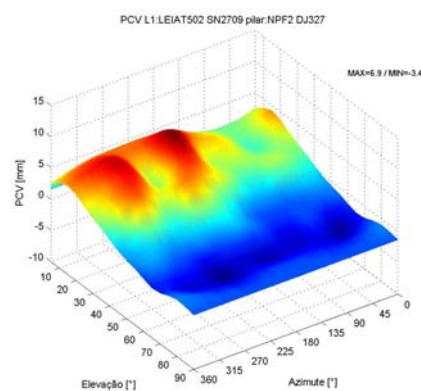


## ANTENA LEIAT502

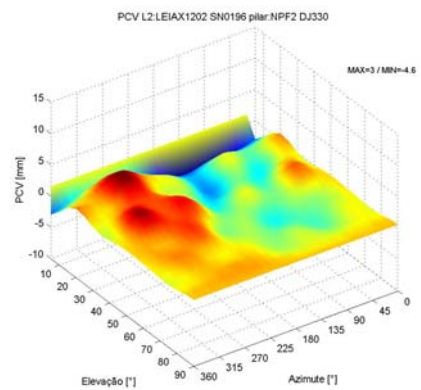
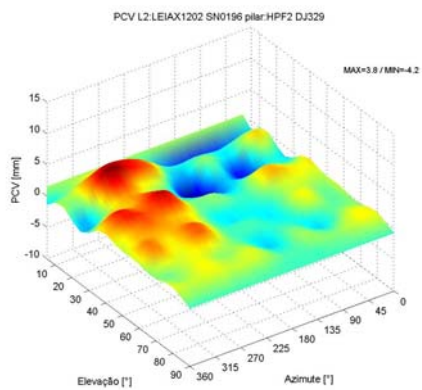
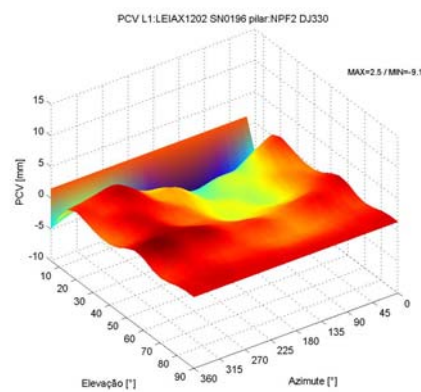
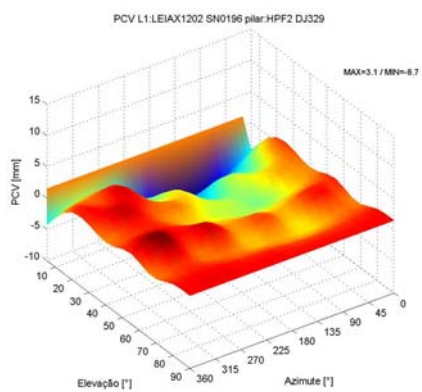
### HPF2



### NPF2



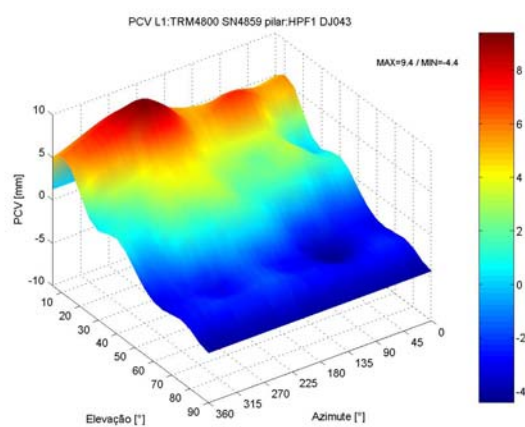
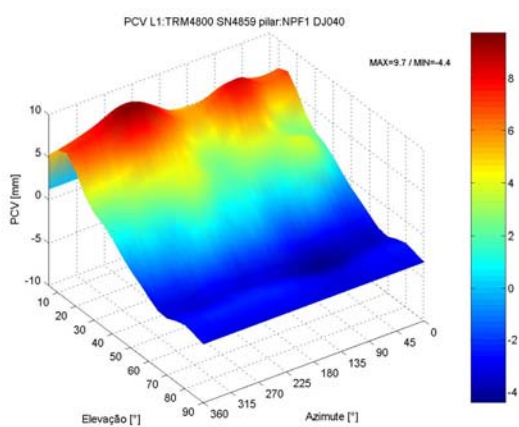
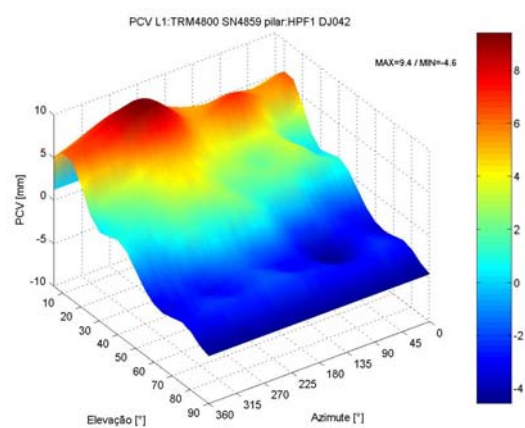
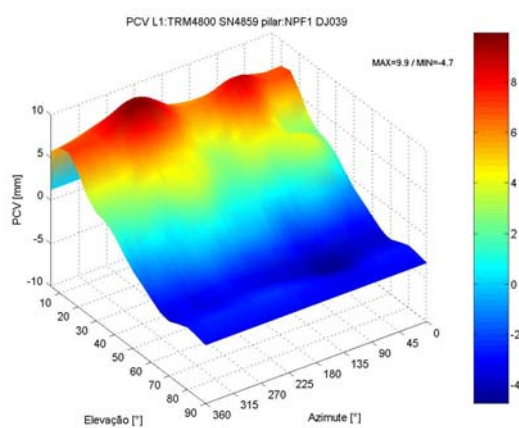
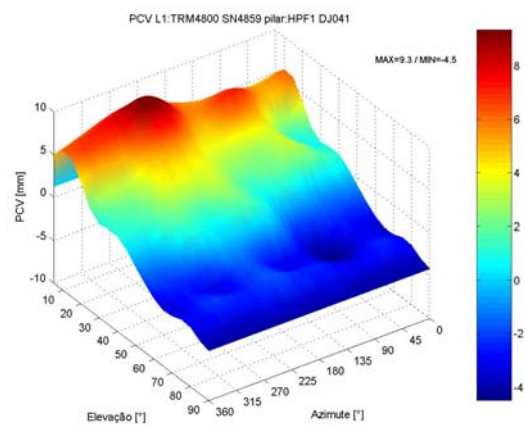
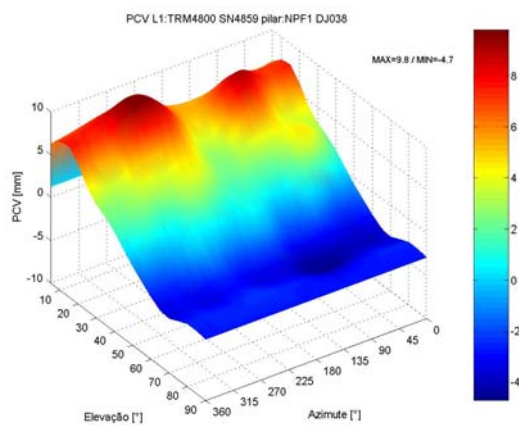
## ANTENA LEIAX1202



# ANTENA TRM4800 – PORTADORA L1

*NPF1*

*HPF1*

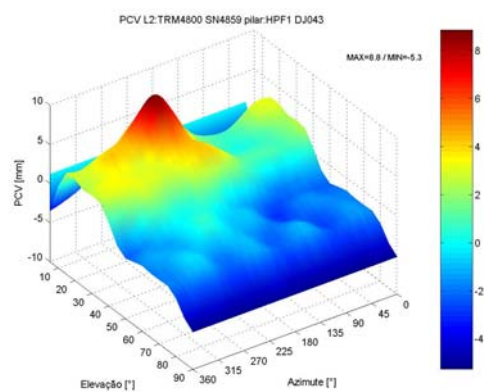
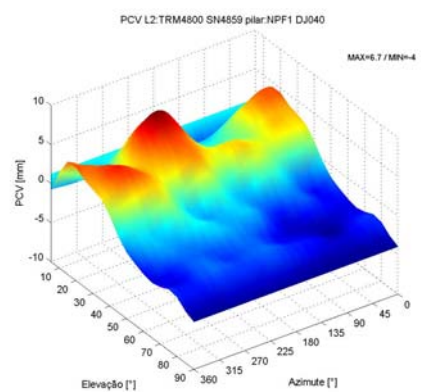
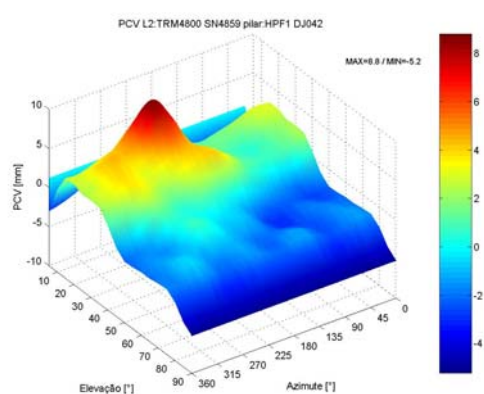
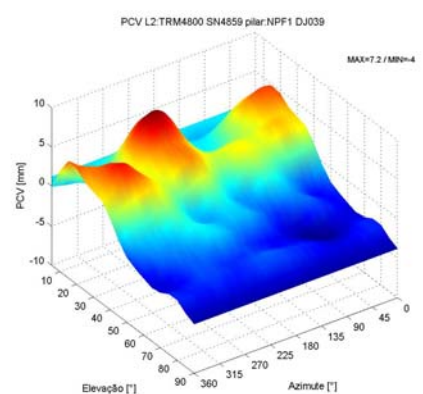
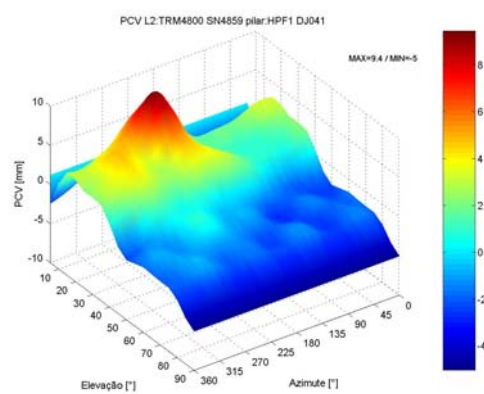
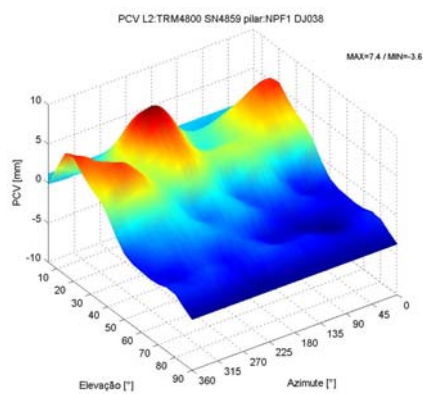




## ANTENA TRM4800 – PORTADORA L2

*NPF1*

*HPF1*



## APÊNDICE 5 – CONFIGURAÇÃO DOS CENÁRIOS PARA ANÁLISE DA CORRELAÇÃO DA SNR

CENÁRIO	SEÇÃO	DIA GPS	DJ	PILAR	ANTENA	ADAPT.	GP	MARF	REC.
Pilar	<i>1</i>	1331-2	193	HPF1	8918	L	+	-	1439
		1331-3	194	HPF2	8918	L	+	-	1439
	<i>2</i>	1332-0	198	HPF1	9555	L	+	-	1439
		1332-2	200	HPF2	9555	L	+	-	7636
	<i>3</i>	1333-2	207	HPF2	8918	DRB	+	-	1439
		1333-3	208	NPF2	8918	DRB	+	-	1439
Antena	<i>1</i>	1331-1	192	HPF1	8918	C	+	-	1439
		1331-4	195	HPF1	9555	C	+	-	1439
	<i>2</i>	1332-2	200	HPF1	8918	C	+	-	1439
		1332-4	202	HPF1	9555	C	+	-	1439
	<i>3</i>	1331-1	192	HPF1	8918	C	+	-	1439
		1332-4	202	HPF1	9555	C	+	-	1439
Adaptador	<i>1</i>	1331-4	195	HPF1	9555	C	+	-	1439
		1331-6	197	HPF1	9555	L	+	-	1439
	<i>2</i>	1332-1	199	HPF2	9555	C	+	-	7636
		1332-2	200	HPF2	9555	L	+	-	7636
GP	<i>1</i>	1305-2	011	NPF2	8918	DRB	+	-	3214
		1305-6	015	NPF2	9555	DRB	-	-	3214
	<i>2</i>	1305-2	011	HPF2	9555	DRB	+	-	3196
		1305-6	015	HPF2	9555	DRB	-	-	3196
	<i>3</i>	1305-4	013	HPF2	8914	DRB	+	-	3196
		1305-5	014	HPF2	8914	DRB	-	-	3196
MARF	<i>1</i>	1336-4	230	NPF2	9555	C	+	+	1439
		1337-2	235	NPF2	9555	C	+	-	1439
Receptor	<i>1</i>	1331-3	194	HPF2	8918	AL	+	-	1439
		1331-4	195	HPF2	8918	L	+	-	7636
	<i>2</i>	1332-4	202	NPF2	8918	L	+	-	7636
		1332-6	204	NPF2	8918	L	+	-	1439
Cenários diferentes	<i>1</i>	1308-3	033	HPF2	5817	DRB	+	-	3196
		1308-3	033	NPF2	7000	DRB	+	-	3214
	<i>2</i>	1332-2	200	HPF1	8918	C	+	-	1439
		1333-2	200	HPF2	9555	L	+	-	7636
	<i>3</i>	1332-4	202	HPF1	9555	C	+	-	1439
		1332-4	202	NPF2	8918	L	+	-	7636

L = longo; C = curto;

MARF: Material absorvente de rádio frequência;

Rec: receptor.